

VŠB – Technická Univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Návrh zařízení pro denitrifikaci spalin
metodou SNCR ve fluidním kotli

Design Equipment for Flue Gas
Denitrification SNCR by Fluidized Boiler

Student: Bc. Tomáš Hegr
Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Hegr**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh zařízení pro denitrifikaci spalin metodou SNCR ve fluidním kotli**
Design Equipment for Flue Gas Denitrification SNCR by Fluidized Boiler

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Rešerši možných zařízení pro snížení emisí NO_x ze spalin.
2. Návrh zařízení pro vstřikování reagentu do spalovací komory.
3. Návrh rozmístění trysek do spalovací komory.
4. Zhodnocení dosažených výsledků.

Grafické práce:

1. Výkresová dokumentace sestavy trysky s nosnou trubicí.
2. Výkresová dokumentace kotle s rozmístěním trysek.

Seznam doporučené odborné literatury:

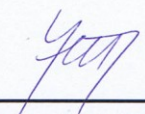
- [1] ČERNÝ, V. a kol.. *Parní kotle a spalovací zařízení*. SNTL Praha, 1975.
- [2] KOLAT, P. *Přenos tepla a hmoty*. Skripta VŠB - TU Ostrava, 1987.
- [3] ON 074017 *Tepelný výpočet parních kotlů*.
- [4] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2005.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

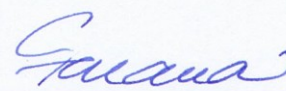
Vedoucí diplomové práce: **Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

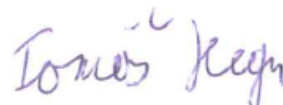



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 21. 5. 2012

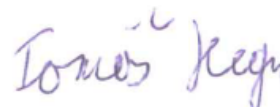


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21. 5. 2012



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Hegr

Adresa trvalého pobytu autora práce: Karlova Studánka 2, Karlova Studánka, 793 24

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HEGR, T. *Návrh zařízení pro denitrifikaci spalín metodou SNCR ve fluidním kotli : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 69 s. Vedoucí práce: Čech, B.

Tato diplomová práce se zabývá tvorbou škodlivin během spalovacího procesu a to konkrétně oxidů dusíku. Popisuje jednotlivé způsoby tvorby a typy oxidů dusíku. Představuje nejvýznamnější producenty, kteří se podílejí na tvorbě škodlivin. Popisuje řešení možných zařízení pro snížení emisí NO_x ze spalín. Porovnává jejich realizovatelnost, klady a zápory. V praktické části je zpracován návrh zařízení pro denitrifikaci spalín ve fluidním kotli o výkonu 30,47 MW s využitím metody SNCR. Seznamuje čtenáře s fluidními kotli včetně jejich výhod. Návrh obsahuje stechiometrický výpočet spalín pro dvě výkonové hladiny (40 t/h a 18 t/h). Zabývá se volbou redukčního činidla a určuje jeho množství. Na závěr je zhodnocení dosažených výsledků.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

HEGR, T. *Design Equipment for Flue Gas Denitrification SNCR by Fluidized Boiler : Diploma Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2012, 69 p. Thesis head: Čech, B.

This thesis deals with the production of the pollutants during the burning process, concretely within the combustion of the nitrogen oxides. It describes particular formation methods and types of nitrogen oxides. Thesis represents the major pollution producers. It also records the solutions of possible devices used for the flue gas emission minimization and compares their feasibility, pros-and-cons. The concept of the flue gas denitrification device in the fluid boiler with the duty of 30,47 MW is processed in the practical part. It uses the SNCR method. It introduces the fluid boilers, including their positives, to the readers. The design involves the stoichiometric calculation of the flue gases for two power levels (40 t/h and 18 t/h). It is concerned with the selection of the reductant and it determines its amount. The valuation of the achieved results is given at the conclusion.

KLÍČOVÁ SLOVA

- znečišťující látka
- emise
- denitrifikace
- aditivum

KEYWORDS

- pollutant
- emission
- denitrification
- additive

Obsah

1	SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A INDEXŮ	8
1.1	Značení a jednotky	8
1.2	Dolní a horní indexy	9
2	ÚVOD	10
3	TERMÍNY A DEFINICE	11
4	TVORBA A ROZDĚLENÍ NO _x	13
4.1	Termické NO _x	14
4.2	Palivové NO _x	14
4.3	Rychlé (promptní) NO _x	15
5	ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ TVORBY NO _x	16
5.1	Primární opatření	17
5.2	Sekundární opatření	20
5.2.1	Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	21
5.2.2	Jednotlivé druhy redukčních činidel	25
5.2.3	Selektivní katalytická redukce (SCR)	28
5.2.4	Technologie SNCR/SCR	34
5.2.5	Obecné porovnání sekundárních opatření ke snížení emisí NO _x	34
6	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO DENITRIFIKACI SPALIN VE FLUIDNÍM KOTLI	35
6.1	Všeobecné informace o fluidních kotlích	35
6.1.1	Výhody fluidních kotlů	36
6.1.2	Síly působící na částice ve fluidní vrstvě	37
6.1.3	Dělení fluidních kotlů	37
6.1.4	Měření na fluidních kotlích	40
6.2	Základní údaje o společnosti Teplárna Strakonice, a.s.	41
6.3	Popis řešeného kotle	41
6.3.1	Popis fluidního topeniště	42
6.3.2	Teplosměnné plochy	42
6.3.3	Základní technické parametry kotle	43
6.4	Složení paliva	43
6.4.1	Parametry spalin	44
6.5	Stechiometrický výpočet pro výkon kotle 40 t/h (objemově)	44
6.6	Stechiometrický výpočet pro výkon kotle 18 t/h (objemově)	48
6.7	Volba redukčního činidla	49
6.7.1	Vlastnosti reagentu NO _x AMID 40	49
6.7.2	Výpočet stechiometrického množství reagentu (výkon kotle 40 t/h)	49
6.7.3	Výpočet stechiometrického množství reagentu (výkon kotle 18 t/h)	52
6.8	Volba nosného média	53
6.9	Volba rozprašovacího média	53

6.10	Vlastní návrh rozstřikovacího kopí	53
6.10.1	Model proudění a rozstřík rozstřikovacího kopí.....	59
6.11	Technicko technologický popis navrženého zařízení SNCR	62
6.11.1	Obecný popis	62
6.11.2	Skladování a zásobování.....	62
6.11.3	Čerpadla a zpětná cirkulace	62
6.11.4	Míchací a měřicí modul	63
6.12	Návrh rozmístění trysek do spalovací komory	64
6.12.1	Průběh teplot v kotli.....	65
7	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	66
8	ZÁVĚR	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

1 SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A IDEXŮ

1.1 Značení a jednotky

Značka	Veličina	Jednotka
A	obsah popela	%
C	obsah uhlíku, podíl spálených látek	%
c	koncentrace	l
CO	obsah oxidu uhelnatého	%
CO_2	obsah oxidu uhličitého	%
d	průměr	m
F	síla	N
g	gravitační zrychlení	m^2/s
H	obsah vodíku	%
H_2O	voda, vodní pára	%
HCl	hmotnost chlorovodíku ve spalinách	mg / m_N^3
HF	hmotnost fluorovodíku ve spalinách	mg / m_N^3
HU	hnědé uhlí	%
M	molární hmotnost	g/mol
N	obsah dusíku	%
N_2	molekulární dusík	mg / m_N^3
N_2O	oxid dusný	mg / m_N^3
N_2O_3	oxid dusitý	mg / m_N^3
N_2O_5	oxid dusičný	mg / m_N^3
NH_3	množství čpavku	mg / m_N^3
NO	oxid dusnatý	mg / m_N^3
NO_2	oxid dusičitý	mg / m_N^3
NO_x	oxidy dusíku	mg / m_N^3
O	obsah kyslíku	%
P	výkon	W
p	tlak	Pa
p''_p	parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu	Pa
Q_i	výhřevnost	MJ / kg
Q_m	hmotnostní průtok	kg/h
S	obsah síry	%
SO_2	obsah oxidu siřičitého	%, mg / m_N^3

Značka	Veličina	Jednotka
t	teplota	$^{\circ}\text{C}$
V	objem složky ve spalínách	$m_N^3 / \text{kg}, m_N^3 / h$
v	rychlost	m/s
w	obsah vody, vlhkost paliva	%
α	přebytek vzduchu	1
β	stechiometrický přebytek reagentu	1
Δ	přírůstek, rozdíl	mg / m_N^3
ν	součinitel vlhkého vzduchu	1
ρ	hustota	kg/m^3
φ	relativní vlhkost	1
η	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$

1.2 Dolní a horní indexy

Index dolní	Význam
bar	barometrický
$CO(NH_2)_2$	močovina
\check{c}	částice
G	tíhová
H_2O	voda, vodní pára
NO	oxid dusnatý
NO_2	oxid dusičitý
O_2	kyslík
r	reagent
sk	skutečný
sp	spaliny
t	teoretický
tep	tepelných
v	vztlková
vz	vzduch
jm	jmenovitý
max	maximální

Index horní	Význam
l	stávající
2	požadovaný
a	analytický stav
h	hořlavina
r	surový stav
ref	referenční
s	suchý
$skut$	skutečný
v	vlhký

2 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá návrhem zařízení pro denitrifikaci spalin metodou selektivní nekatalytické redukce (SNCR) ve fluidním kotli. Popisuje způsoby tvorby a rozdělení oxidů dusíku ve spalínách a uvádí postupy pro jejich snižování. Tato jednotlivá opatření mezi sebou porovnává.

V současné době se pro energetické účely u nás ve velké míře využívá spalování fosilních paliv (zejména uhlí). Jejich spalováním ale dochází k závažnému a v časovém měřítku značnému dopadu na životní prostředí. Spalovací proces vede k tvorbě emisí do ovzduší, vody a půdy, z nichž emise do ovzduší se považují za jedny z hlavních, které se přímo dotýkají životního prostředí. Je důležité vést spalovací proces takovým způsobem, aby se minimalizoval vznik těchto škodlivin a byly dodrženy emisní limity.

Mezi škodliviny, jejichž množství lze zcela nebo výrazně omezit vedením spalovacího procesu patří oxidy dusíku označované sumárním symbolem NO_x , které jsou toxické pro živé organismy a způsobují vážné ekologické problémy např.: smog ve městech, kyselé deště, ztenčování ozónové vrstvy. Oxidy dusíku zahrnují ve velké míře zejména oxid dusnatý NO (90 – 99 %), který je jedovatý a za přítomnosti vlhkosti leptavý a oxid dusičitý NO_2 (1 – 10 %), který je agresivní, jedovatý a způsobuje otok plic. Vedle nich se v malém množství mohou vyskytovat další oxidy dusíku jako např.: oxid dusný N_2O , oxid dusitý N_2O_3 a oxid dusičný N_2O_5 .

Jako nejvýznamnější producenti těchto oxidů se projeví mobilní a stacionární zdroje. Mezi mobilní zdroje patří přenosná zařízení vybavená spalovacími motory (kompresory, čerpadla, pily, sekačky, atd.) a dopravní prostředky (silniční a drážní vozidla, letadla a lodě), které představují významný podíl produkce NO_x (60 %). Za stacionární zdroje jsou označovány především zařízení určené ke spalovacímu nebo jinému technologickému procesu, které znečišťují ovzduší (elektrárny, teplárny, kogenerační jednotky, rafinérie, atd.). Chemické reakce vedoucí ke vzniku oxidů dusíku mají velkou energetickou bariéru (180 kJ/mol), tvoří se všude tam, kde jsou v průmyslových procesech potřebné vysoké teploty.

3 TERMÍNY A DEFINICE

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [1]

znečišťující látka (*pollutant*)

jakákoliv látka vnesená do vnějšího ovzduší, nebo v něm vznikající, která má přímo nebo může mít po fyzikální nebo chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou škodlivý vliv na život, zdraví lidí a zdraví zvířat, na životní prostředí, na klimatický systém Země nebo na hmotný majetek.

znečišťování ovzduší (*air pollution*)

vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do ovzduší v důsledku lidské činnosti vyjádřené v jednotkách hmotnosti za jednotku času.

zdroj znečišťování ovzduší (*source of air pollution*)

zařízení, plocha nebo prostor, které znečišťují nebo mohou znečišťovat ovzduší a pro které se vydávají kolaudační nebo jiná rozhodnutí či povolení.

emise (*emission*)

vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do životního prostředí.

emisní limit (*emission limit*)

nejvýše přípustné množství znečišťující látky (nebo stanovené skupiny znečišťujících látek) vypouštěné do ovzduší ze zdroje znečišťování ovzduší vyjádřené jako hmotnostní koncentrace znečišťující látky v odpadních plynech (např. mg / m_N^3) nebo hmotnostní tok znečišťující látky za jednotku času (např. t / h) nebo hmotnost znečišťující látky vztažené na jednotku produkce (např. $kg SO_2 / t$ vyrobené H_2SO_2) nebo lidské činnosti.

emisní strop (*emission ceiling*)

nejvýše přípustná úhrnná emise znečišťující látky (nebo stanovené skupiny znečišťujících látek) vznikající v důsledku lidské činnosti vyjádřená zpravidla v hmotnostních jednotkách za období jednoho roku ze všech zdrojů znečišťování, nebo z jejich vymezené skupiny, na vymezeném území

imise (*immission*)

znečištění ovzduší vyjádřené hmotnostní koncentrací znečišťující látky nebo stanovené skupiny znečišťujících látek.

imisní limit (*immission limit*)

hodnota nejvýše přípustné úrovně znečištění ovzduší vyjádřená v jednotkách hmotnosti na jednotu objemu vzduchu při normální teplotě a tlaku (tj. při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $101,325\text{ kPa}$), např. mg / m^3 nebo $\mu g / m^3$.

denitrifikace (*denitrification*)

proces redukce dusičnanů, který může nakonec vést k molekulárnímu dusíku, jak je vidět ve vztahu číslo (1).

**ekonomizér** (předeřívák napájecí vody) (*economizér*)

tepelný výměník využívající teplo spalin o nízké teplotě k předeřívání napájecí vody. Ekonomizér je složen z trubkových hadů, jimiž protéká ohřívána voda. Je zavěšen v tahu kotle obvykle před ohřívákem vzduchu a je ohříván proudícími spalinami.

palivo (*fuel*)

plynný, kapalný nebo tuhý hořlavý materiál vhodný ke spalování ve zdrojích znečišťování ovzduší a splňující požadavky na kvalitu a vlastnosti stanovené Ministerstvem životního prostředí. (Palivem není odpad podle zákona 185/2001 Sb. o odpadech).

popelovina (*ash*)

směs různě chemicky vázaných materiálů v palivu, při jejichž spalování dochází k chemickým reakcím a produkty těchto reakcí tvoří popel.

hořlavina (*flammable*)

sumární obsah všech spalitelných látek obsažených v palivu. Hořlavina se dá rozdělit na aktivní prvky (C, H, S) a pasivní prvky (N, O).

stechiometrie (*stoichiometry*)

část chemie studující kvantitativní zákonitosti při chemických reakcích pomocí výpočtů založených na chemických rovnicích a vzorcích.

aditivum (*additive*)

látka, která se přivádí do jiných látek či směsí s cílem upravit (vylepšit) jejich vlastnosti.

koncentrace (*concentration*)

poměr sledované látky k celkovému množství roztoku nebo směsi. Existují různé typy koncentrací jako např.: hmotnostní, objemová a molární.

redukční cíl (*reduction target*)

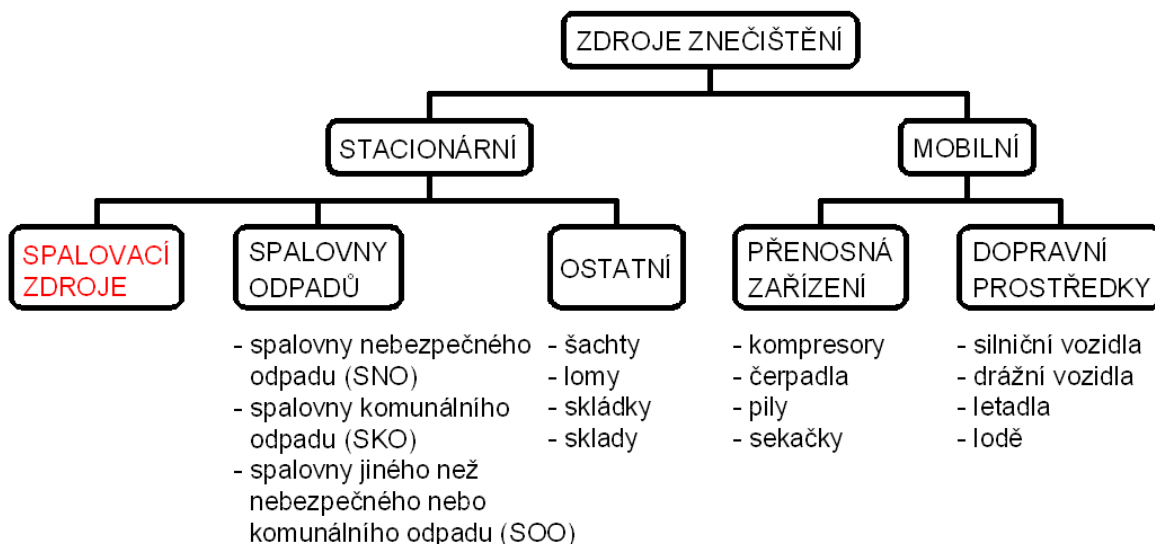
procento, o které je nutno ve stanoveném termínu snížit emise znečišťující látky nebo stanovené skupiny znečišťujících látek ze všech zdrojů znečišťování umístěných na vymezeném území, případně z vymezené skupiny zdrojů znečišťování, ve srovnání s rokem stanoveným jako referenční.

exergie (exergy)

část energie, kterou lze přeměnit na mechanickou práci.

4 TVORBA A ROZDĚLENÍ NO_x

Rozdělení jednotlivých zdrojů znečištění je vidět na *obr. 1*.



Obr. 1. Rozdělení zdrojů znečištění

Tato diplomová práce se zabývá tvorbou oxidů dusíku ve stacionárních zdrojích. Tyto zdroje se dělí na:

- Zvláště velké zdroje (ZVZ):** jmenovitý tepelný příkon nad 50 MW
bez přihlédnutí k tepelnému výkonu
- Velké zdroje (VZ):** jmenovitý tepelný příkon do 50 MW
jmenovitý tepelný výkon nad 5 MW
- Střední zdroje (SZ):** jmenovitý tepelný výkon od 0,2 do 5 MW
- Malé zdroje (MZ):** jmenovitý tepelný výkon do 0,2 MW

Pro tvorbu oxidů dusíku je významný již samotný typ ohniště, jeho konstrukce a stav. Novější zařízení mají vyšší účinnost výroby, což znamená mimo jiné nižší tvorbu emisí na jednotku vyrobené energie. Zvyšování účinnosti zařízení není neomezené, jednak z důvodu snižování návratnosti ze zvyšujících se nákladů na vývoj nových technologií, jednak vzhledem k zákonům termodynamiky.

Rozhodující vliv na tvorbu NO_x u různých spalovacích zařízení, má teplota hoření, která je nejvyšší u výtavných kotlů, a rychlost uvolňování tepla v oblasti hoření, která je nižší u fluidních kotlů. Nižší tvorba NO_x se projevuje také při snižování výkonu kotle.

U různých zařízení se liší produkce NO_x :

- Plynové: $240 - 1400 \left[\text{mg} / \text{m}_N^3 \right]$
- Olejové: $500 - 1500 \left[\text{mg} / \text{m}_N^3 \right]$
- Granulační: $800 - 1700 \left[\text{mg} / \text{m}_N^3 \right]$
- Výtavné: $1600 - 2000 \left[\text{mg} / \text{m}_N^3 \right]$
- Fluidní: $400 - 800 \left[\text{mg} / \text{m}_N^3 \right]$

Během spalovacích procesů se tvoří oxidy dusíku v zásadě prostřednictvím tří základních mechanismů, které jsou charakteristické původem dusíku a prostředím, kde reakce probíhá. Podle způsobu tvorby se také rozdělují.

4.1 Termické NO_x

Vznikají oxidací dusíku ze spalovacího vzduchu za vysokých teplot. Na jejich vznik má vliv teplota, koncentrace kyslíku a doba zdržení v horké zóně. Produkce termických NO_x se stává významnou až při teplotách spalovacího procesu, které jsou vyšší než 1500°C . Rychlosti produkce NO_x se zvyšuje přibližně dvakrát při zvýšení teploty plamene o ca. 40°C . Tento typ je hlavní příčinou vzniku oxidů dusíku u zařízení, která spalují plynná nebo kapalná paliva.

4.2 Palivové NO_x

Vznikají oxidací chemicky vázaného dusíku v palivu. Střední obsah dusíku, obvykle se vyskytující u různých druhů paliva, uvádí *tab. 1*. Proces tvorby palivových NO_x není ještě doposud přesně znám (stejně jako samotný proces hoření fosilních paliv). Je ale známo, že produkce těchto NO_x je citlivější na lokální stechiometrický poměr (palivo/vzduch) než na teplotu spalovacího procesu.

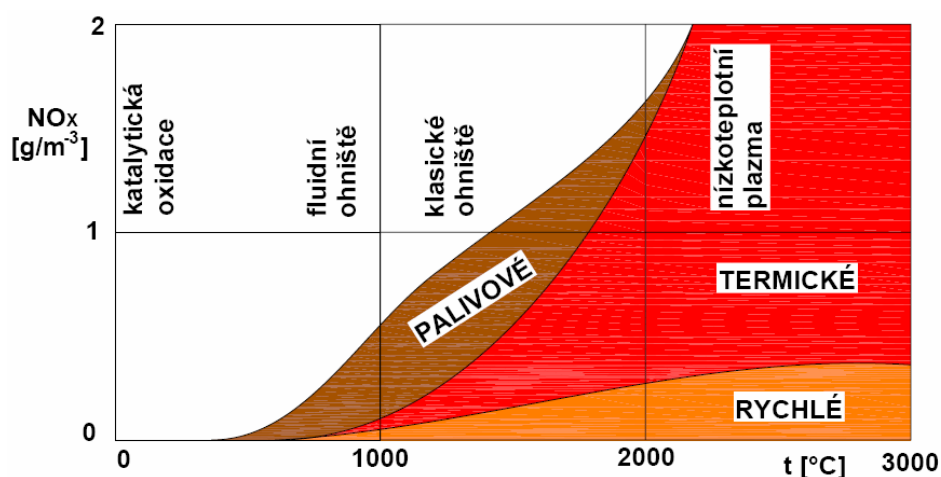
Palivo	Dusík vázaný v palivu (% hmotnosti, sušina, bezpopelnatě)
uhlí	0,5 – 2
biomasa (dřevo)	< 0,5
rašelina	1,5 - 2,5
topný olej	< 1,0
zemní plyn	< 0,1

Tab. 1. Dusík vázaný v palivu [5]

4.3 Rychlé (promptní) NO_x

Představují určitou formu palivových NO_x. Vznikají oxidací chemicky vázaného dusíku radikálovými reakcemi na rozhraní plamene. Jsou charakterizovány krátkodobostí, malou závislostí na teplotě a velkou závislostí na přebytku vzduchu. Jejich podíl na celkovém obsahu NO_x je zanedbatelný.

Při všech těchto mechanismech, které jsou uvedeny v kapitole 4, vzniká oxid dusnatý NO, který pak v přítomnosti kyslíku dále oxiduje na NO₂. Každý z výše popsaných mechanismů se větší či menší měrou podílí na výsledné tvorbě oxidů dusíku a to v závislosti na teplotě, jak je vidět na obr. 2.



Obr. 2. Tvorba NO_x v závislosti na teplotě [2]

5 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ TVORBY NO_x

Největší procento NO_x (zhruba 70 %) je produkováno lidskou činností a zbylá část je produkována přírodními procesy (sopky, biologické procesy apod.). Problém kontroly emisí NO_x je v dnešní době intenzivně řešený problém. Současný limit obsahu NO_x ve spalinách pro energetická zařízení o celkovém výkonu nad 100 MW na pevná paliva a biomasu je 600 mg/m_N^3 . Pro kotle na kapalná paliva je tento limit 450 mg/m_N^3 . Nově postavená zařízení od roku 2008 musí splňovat limit 200 mg/m_N^3 a od roku 2016 musejí tento limit splňovat všechna provozovaná zařízení. Při referenčním obsahu 6 % kyslíku ve spalinách.

Jedním způsobem, jak těchto limitů dosáhnout, je optimalizace využití energie a účinnosti procesu její výroby. Optimalizace specifické účinnosti závisí na řadě faktorů jako např.: povaha a jakost paliva, typ spalovacího systému, provozní teploty, místní klimatické podmínky, typ používaného chladicího systému. Každý následující krok v procesu přeměny paliva na užitečnou energii má svou vlastní účinnost. Celková účinnost procesu se dosáhne vynásobením všech dílčích účinností.

Dokonce i nejvýkonnější energetická zařízení vypouštějí v současnosti značná množství svého celkového příkonu energie do životního prostředí v podobě odpadního tepla. Toto teplo se může absorbovat do místního ovzduší nebo vodních toků s minimálním poškozením životního prostředí, ale každá jednotka spotřebované energie představuje další produkci emisí, které odcházejí do atmosféry. V současné době je nejúčinnějším způsobem ke zlepšení účinnosti výroby energie, užitečně využívat zbytkové teplo a nenechat je unášet pryč. Pro zužitkování odpadního tepla je třeba vzít v úvahu několik termodynamických, technických a ekonomických kritérií. Termodynamická kritéria zahrnují na jedné straně teplotu a na druhé straně výsledný obsah exergie odpadního tepla. S teplotou se musí počítat, pokud se odpadní teplo bude využívat při vytápění. Obsah exergie je třeba brát v úvahu tehdy, bude-li se odpadní teplo využívat k výrobě elektřiny a tepelné energie. Technická kritéria závisejí na podmínkách jednotlivých míst.[5]

Jako další způsoby snižování oxidů dusíku ve spalinách se využívají tzv. primární opatření a sekundární opatření. Vývojový trend v poslední době spočívá v kombinovaném používání obou opatření v optimalizované konfiguraci. Umožňuje dosáhnout minimální tvorbu emisí, optimalizovat podmínky, při nichž dochází k chemickým reakcím a snížit spotřebu chemikálií potřebných k reakcím.

Musíme pamatovat na to, že při zásazích do spalovacích procesů za účelem snížení oxidů dusíku, můžeme způsobit několik nepříznivých jevů, které se týkají:

- Stability hoření
- Množství mechanického a chemického nedopalu
- Struskování stěn ohniště
- Koroze
- Výstupní teploty spalin

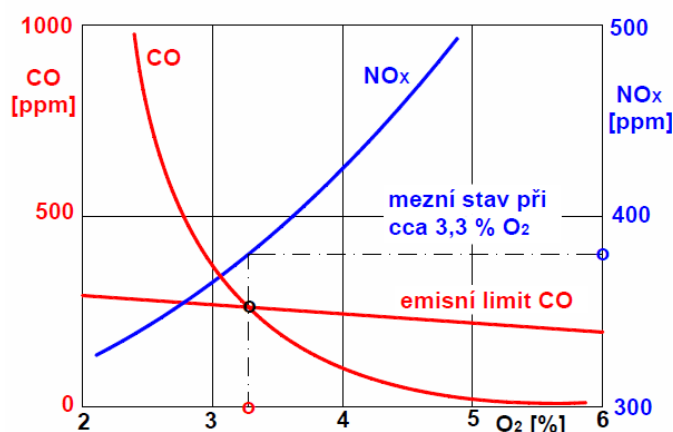
5.1 Primární opatření

Spočívají v omezování tvorby NO_x během spalovacího procesu a to zejména potlačením negativních vlivů teplotních výkyvů a nesymetrií spalování ve spalovací komoře. Tato opatření upravují projektové parametry nebo provoz spalovacích zařízení takovým způsobem, aby se tvorba oxidů dusíku snížila nebo aby se již vytvořené oxidy dusíku samovolně redukovaly uvnitř kotle, ještě před jejich vypuštěním. Platí, že primární opatření jsou levnější než následná denitrifikace spalin (sekundární opatření, které jsou popsány v kapitole 5.2), nelze je však s ohledem na celou řadu komplikací provádět libovolně. Při úpravách provozovaných spalovacích zařízení, lze dosáhnout snížení NO_x o 40 až 60 %.

Mezi primární opatření patří:

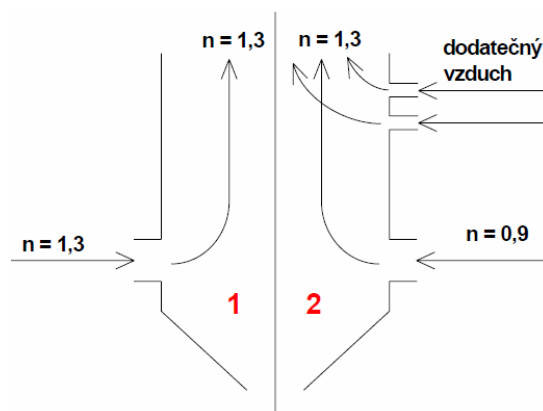
- Změna paliva
 - z pevného na kapalné nebo plynné a z kapalného na plynné, využívání paliv s nižším obsahem dusíku.
- Snížení výkonu
- Snížení teploty hoření
- Omezený ohřev vzduchu
 - snížení teploty ohřátého spalovacího vzduchu má za následek nižší teplotu plamene a nižší špičkovou teplotu v primární zóně spalování. Díky tomu tedy dochází k nižší tvorbě tepelných NO_x . Existují dvě hlavní nevýhody této technologie. 1. v některých kotlích např. u výtavných kotlů se při spalování uhlí vyžadují vysoké spalovací teploty a tudíž jsou pro náležité fungování spalovacího zařízení zásadní vysoké teploty ohřevu vzduchu. 2. snížení teploty předehřátého vzduchu má za následek vyšší spotřebu paliva.
- Nízký přebytek spalovacího vzduchu
 - jde o poměrně jednoduché a snadno proveditelné provozní opatření, nevyžaduje žádné úpravy na zařízení. Snížením množství spalovacího vzduchu, na minimální množství potřebné pro dokonalé spálení paliva, se

sníží přeměna dusíku vázaného v palivu a v menší míře i tvorba tepelných NO_x , protože se sníží teplota plamene. Nelze použít u elektrárenských kotlů, které mají poměr spalování optimalizován. Efekt tohoto zásahu není příliš významný a nevyváží nevýhody: snížení teploty páry, tvorba sazí, ztráty nedopalem, zvýšení produkce oxidu uhelnatého, snížení účinnosti kotle, škvárování, koroze.

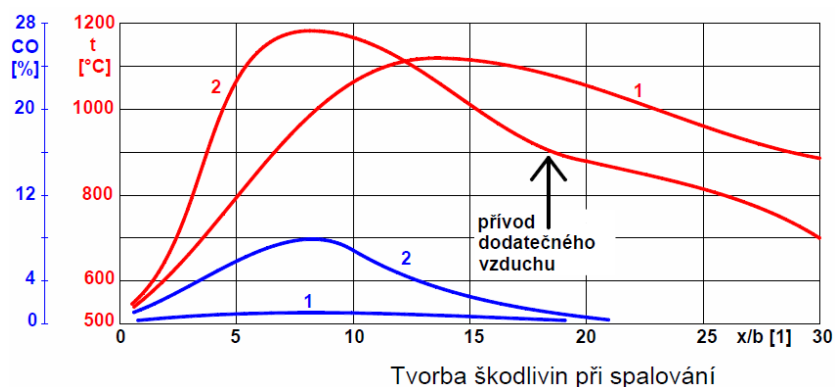


Graf 1. Závislost tvorby CO a NO_x na množství spalovacího vzduchu [2]

- Postupný přívod spalovacího vzduchu
 - odstupňování vzduchu v topeništi nezvyšuje spotřebu energie spalovacího zařízení a nemá při správném použití nepříznivé účinky, kromě vyšší teploty hoření. Díky menšímu množství kyslíku ve spalovacím prostoru (podstechiometrické spalování) se tvoří větší množství CO . Pomocí oxidu uhelnatého a částečného ochlazení spalin se redukuje NO , jak je znázorněno ve vztahu číslo (2), obr. 3 a grafu 2. Přidáním dodatečného vzduchu dohoří zbývající CO . Jedná se o poměrně levný způsob snížení emisí.

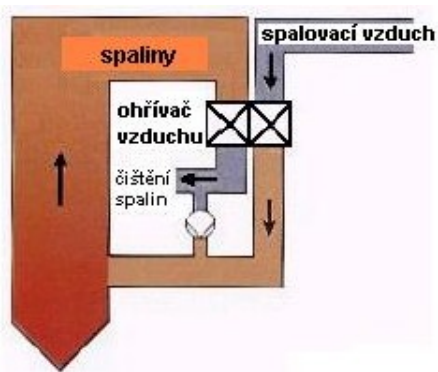


Obr. 3. Jednorázový a postupný přívod spalovacího vzduchu [2]



Graf 2. Jednorázový a postupný přívod spalovacího vzduchu [2]

- Postupný přívod sekundárního paliva a spalovacího vzduchu
 - jako sekundární palivo může být použita část základního paliva nebo chudší směs paliva. Prokázalo se, že dobrým sekundárním palivem je zemní plyn a ještě lepším je vysokopeční plyn, protože se většinou snadno zapaluje a neobsahuje žádné pevné částice ani síru.
- Snížení lokální koncentrace kyslíku
- Zkrácení doby zdržení v pásmu vysoké teploty
- Recirkulace spalin
 - spočívá v částečném odběru spalin za ekonomizérem a jejich zpětnému zavedení do topeniště. Tento postup má za následek snížení obsahu kyslíku, který je k dispozici ve spalovací zóně a snížení spalovací teploty. Proto se omezí jak přeměna dusíku vázaného v palivu, tak tvorba tepelných NO_x . Nejúčinnější je míchání spalin do spalovacího vzduchu, jak je vidět na obr. 4. Nadměrné množství recirkulovaných spalin může vést k omezení provozu např. problémům s korozí, spaluje-li se palivo obsahující síru, ztrátám účinnosti následkem zvýšení teploty v komíně a ke zvýšení spotřeby energie pro ventilátory.



Obr. 4. Recirkulace spalin [5]

- Úprava konstrukce hořáků
 - vhodnějším způsobem připravuje hořlavou směs ke spálení, aby pozdržely mísení, snížily dostupnost kyslíku a snížily vrcholovou teplotu plamene. Hořáky o nízkých emisích zpozdí přechod dusíku vázaného v palivu na NO_x a tvorbu tepelných oxidů dusíku, přičemž se udržuje vysoká účinnost spalování. Tlaková ztráta ve vedení vzduchu se zvyšuje, což způsobuje vyšší výdaje na provoz. Obvykle se musí provést lepší drcení a mletí uhlí a to vede k vyšším nákladům na provoz a údržbu.

5.2 Sekundární opatření

Sekundární opatření jsou dodatečná koncová opatření určené ke snížení emisí na potřebnou úroveň. Spočívají v zavedení skupiny chemických procesů v kotli a následném odstraňování NO_x ze spalin. Tato opatření jsou založena na selektivní katalytické redukci (SCR) a selektivní nekatalytické redukci (SNCR). Mohou být zařazeny samostatně nebo v kombinaci s primárními opatřeními (*kapitola 5.1*). Většina technologií ke snížení emisí NO_x ve spalinách se zakládá na injektáži čpavku, močoviny nebo dalších sloučenin do prostoru spalovací komory kotle nebo do spalinového traktu kotle. Cílem je dosáhnout vysokého stupně snížení NO_x při co nejmenší spotřebě redukčního činidla a nízkém čpavkovém skluzu. Činidlo musí být dobře promícháno se spalinami a musí být rovnoměrně distribuováno ve spalinách v optimálním teplotním rozmezí.

Kromě distribuce a promíchání ve spalinách je důležitá také velikost kapek směsi. Příliš malé kapky by se rychle odpařily a mohly by případně reagovat v oblasti s příliš vysokými teplotami nebo příliš blízko chladnějších stěn kotle. Naopak příliš velké kapky by se odpařily pomalu a vedly by k reakcím v oblasti s nízkými teplotami nebo dokonce zcela mimo teplotní okno, čímž by se zvýšil čpavkový skluz a snížilo by se odstranění NO_x . Oba případy mají negativní dopad na odstranění NO_x , anebo vedou ke zvýšenému čpavkovému skluzu. Možnými nosiči redukčního činidla mohou být stlačený vzduch, pára nebo voda.

Největší rizika při zavádění sekundárních opatření jsou: možné ovlivnění okolí nebo snížení účinnosti při nevhodném provozování.

5.2.1 Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

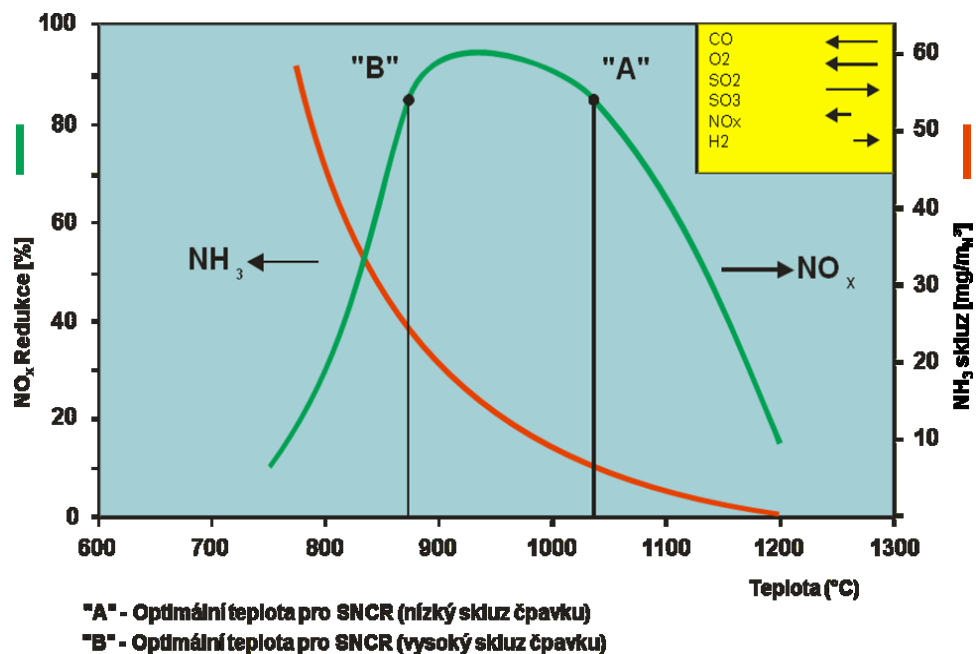
Je založena na vytvoření redukčních podmínek, při kterých jsou do kotle vstřikovány redukční prostředky, jako je čpavek nebo močovina ve formě vodného roztoku. Výsledkem reakcí je ve spalínách molekulární dusík, vodní pára a v případě močoviny i oxid uhličitý. Všechny produkty reakcí jsou přirozenou součástí atmosféry. Charakteristickým znakem této metody je optimální teplotní rozsah, v němž je dosahováno největší redukce NO_x , jak je vidět na *grafu 3*. Optimální teplotní rozsah je mezi teplotami 850 až 1100 °C a pohybuje se v závislosti na složení spalin. Teplotní okno je ovlivněno celou řadou parametrů, které celé okno posouvají směrem k vyšším nebo nižším teplotám. Hlavní vliv na tento teplotní rozsah mají plyny CO a O_2 , které posouvají teplotní okno doleva a SO_2 , který posouvá teplotní okno doprava.

Doba prodlevy spalin uvnitř žádoucího teplotního rozmezí je 0,2 – 0,5 s. Tento časový interval pro kontakt je dost nestálý a proto u poměru čpavku a oxidu dusíku, který je popsán rovnicí (3), musí být čpavek spíše v nadstechiometrickém poměru.

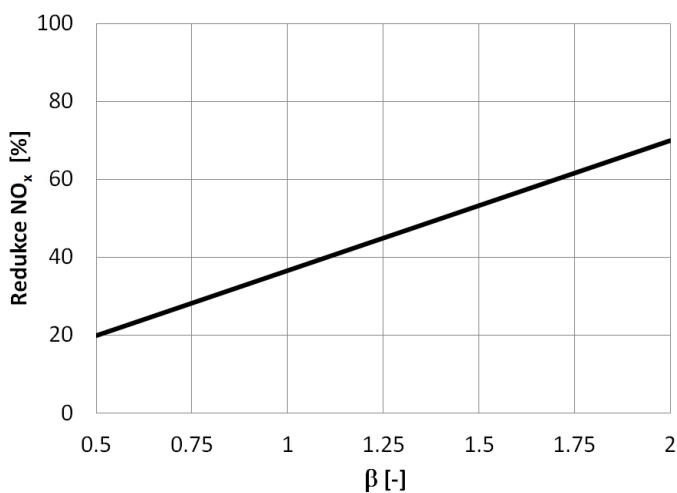
$$\beta = \frac{\text{NH}_3}{\text{NO}_x} \quad [1] \quad (3)$$

Optimální stechiometrický poměr znamená dosažení lepší redukce bez zbytkového čpavku. Celá řada experimentálních studií stanovila optimální stechiometrický poměr přibližně na hodnotu 2, jak je vidět na *grafu 4*. Zvyšováním stechiometrického poměru z hodnoty 1 až do hodnoty 2, se zvyšuje hodnota redukce NO_x bez vlivu na zbytkový čpavek. V rozmezí hodnot 2 až 3 je tento vliv zanedbatelný. Překročením hodnoty přes 3 nemá žádný vliv na redukci NO_x , přičemž ve spalínách začíná narůstat zbytkový čpavek.

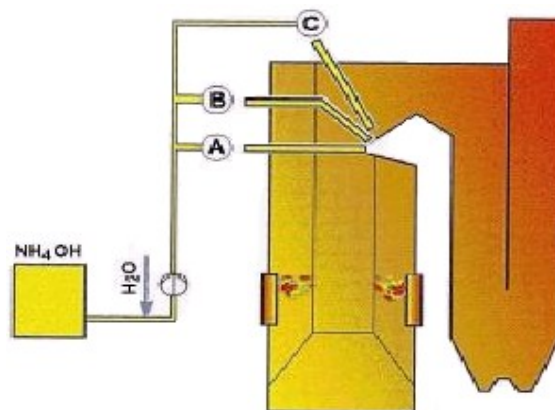
Nad ideálním teplotním rozsahem dochází k přeměně HN_3 radikálů ze směsi činidla a vody na oxid dusíku, což může vést ve skutečnosti ke zvýšení emisí oxidu dusíku. Při nižších teplotách se snižuje reakční rychlost, čímž vzniká čpavkový skluz, který v průběhu následné cesty spalin může vést ke vzniku čpavkových solí a tím k sekundárním problémům. Čpavkový skluz by proto měl být co nejmenší. Pro nastavení žádoucího teplotního rozmezí při nástřiku reagentu je zapotřebí několika nástřikových úrovní, jak je vidět na *obr. 5*.



Graf 3. Vylučování NO_x v závislosti na teplotě [4]



Graf 4. Redukce NO_x v závislosti na stechiometrickém poměru β



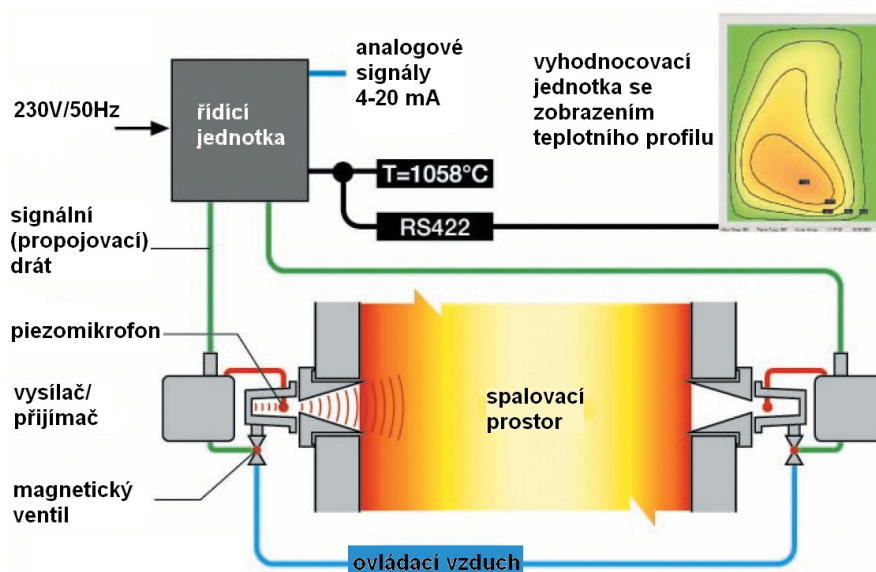
Obr. 5. Proces selektivní nekatalytické redukce [5]

5.2.1.1 Optimalizace SNCR s pomocí akustického měření teploty (agam)

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4]

Aby bylo zajištěno, že při všech možných provozních stavech bude redukční činidlo vstřikováno vždy ve správném rozsahu teplotního okna, kde je stupeň vylučování NO_x nejvyšší a čpavkový skluz nejnižší, používají se u zařízení s nejvyššími nároky akustické systémy měření teploty plynu (agam), pomocí nichž se měří skutečné teploty plynu v průřezu spalovacího prostoru v blízkosti míst vstřikování a zjišťují se teplotní profily.

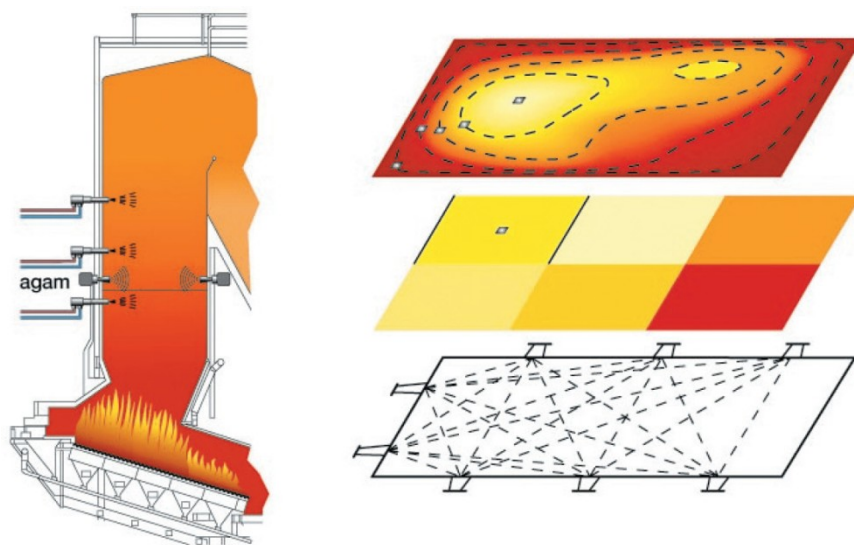
Systém se skládá z mechanicky a elektricky konstrukčně shodných vysílacích a přijímacích jednotek, které jsou umístěny na stěnách spalovacího prostoru a externí ovládací jednotky, jak je vidět na *obr. 6*. Při měření se otevře elektromagnetický ventil v přívodu tlakového vzduchu na straně vysílače, čímž vznikají akustické signály. Signály jsou současně zaznamenány na straně vysílače i přijímače. Z digitálních signálů se zjišťuje doba průchodu zvuku. Protože je známá vzdálenost, kterou musí zvuk urazit, získáme tak rychlost šíření zvuku, která se přepočítá na teplotu. Pomocí více vysílacích a přijímacích jednotek kombinovaně pracujících v jedné rovině, získáváme paralelní konfiguraci, s jejíž pomocí zjistíme bezprostředně bez zpoždění dvojdimenzionální rozložení teploty na jedné úrovni.



Obr. 6. Principiální struktura akustického systému měření teploty plynu agam [4]

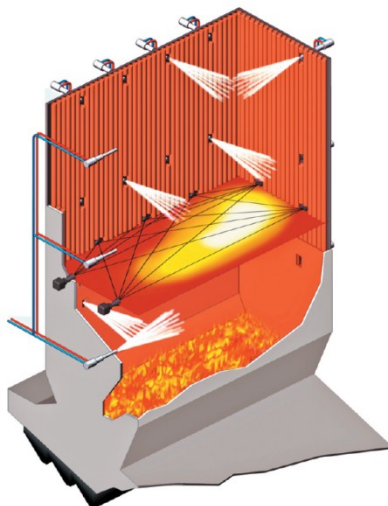
Zjištěný teplotní profil je rozdělen na sekce (*obr. 7*) a může být přiřazen jednotlivým tryskám nebo skupinám trysek, které mohou být přepínány v závislosti na měřené teplotě spalin. Tím je zajištěno, že se redukční činidlo, i při rychle se měnících teplotách spalin, dostane do místa pro reakci nejvhodnější a že zařízení SNCR pracuje vždy v optimální

oblasti, co se týče stupně vylučování NO_x , čpavkového skluzu a spotřeby redukčního činidla.



Obr. 7. Měřicí místa teploty pro technologii SNCR [4]

Zařízení, které je vybaveno více úrovněmi vstřikování, v nichž může být každá jednotlivá tryska přepínána, je zobrazeno na *obr. 8*. Teploty zjištěné pomocí měření agam se mohou použít také pro regulaci výkonu spalování a regulaci stavu spalování.



Obr. 8. Přepínání jednotlivých trysek v závislosti na teplotě [4]

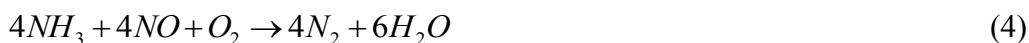
Výhody technologie SNCR:

- Nízké investiční náklady, kdy není nutné provádět přestavbu nebo rekonstrukci spalovací komory popř. zadních partií kotle.
- SNCR technologii je možné v krátké době dodatečně nainstalovat do téměř všech stávajících zařízení, pro které vstřikování do ohniště umožňuje technologický proces provozovaného kotle.
- Dostatečně vysoký odlučovací stupeň emisí NO_x bez použití katalyzátoru.
- Technologie je vhodná pro různé druhy spalovaných paliv.
- Nezvyší se tlaková ztráta spalovacího zařízení.
- Není nutné žádné další ohřívání kouřových plynů za spalovací komorou.
- Redukční činidlo je nepřetržitě vyráběno a je celosvětově k dispozici v dostatečném množství.
- Není nutná žádná další likvidace odpadů, jako např. použitých prvků katalyzátoru.
- Není však příliš vhodná pro kotle se střídavým zatížením nebo s kolísavou jakostí paliva.

Tato metoda má účinnost redukce 30 – 50 % a její elektrická spotřeba je 0,1 – 0,3 % vyrobené energie. Vyžaduje kvalitnější řízení než selektivní katalytická redukce (*kapitola 5.2.3*). Nemůže se použít u plynových turbín z důvodů potřebného teplotního rozmezí a časové prodlevy spalin uvnitř žádaného teplotního rozmezí. Rizika metody jsou při nedokonalé reakci v tvorbě siřičitanu amonného a ve zvýšení koncentrace čpavku ve spalinách.

5.2.2 Jednotlivé druhy redukčních činidel

5.2.2.1 Čpavek



Používání čpavku jako redukčního činidla má některé nevýhody:

- zdraví nebezpečná látka
- složitější technologická zařízení pro skladování a manipulaci
- výrazný zápach
- sloučeniny čpavku a síry mohou vytvářet nežádoucí nánosy na strojním zařízení

5.2.2.2 Močovina



Nevýhodou je, že může dojít ke korozi teplosměnných ploch.

Metoda SNCR založena na použití močoviny sestává z následujících kroků:

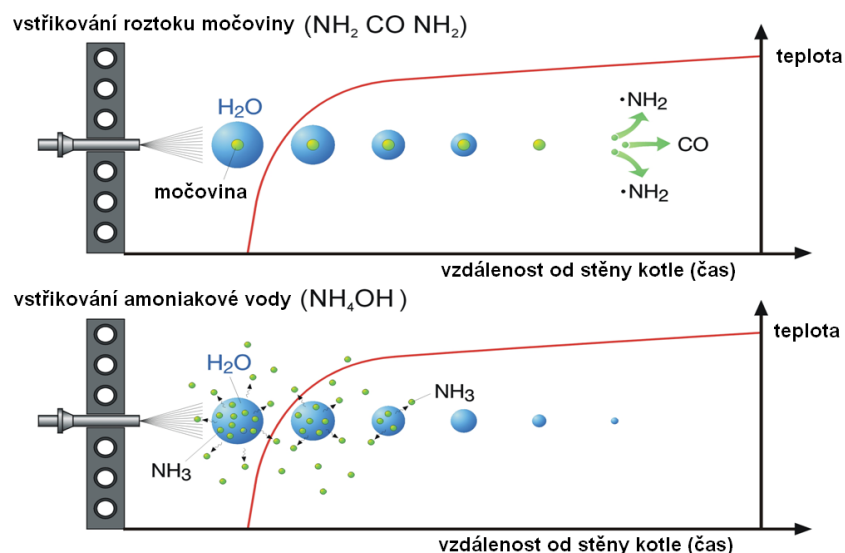
1. Distribuce vodních kapek s obsahem močoviny ve spalínách
2. Odpaření vodních kapek, v nichž je rozpuštěná močovina
3. Rozklad močoviny na reaktivní radikály
4. Reakce plynné fáze mezi NH_2 a NO_x

5.2.2.3 Rozdíl mezi oběma redukčními činidly

Pokud se optimální teplotní okno, vhodné pro průběh reakce, nachází v oblasti teplosměnných ploch (šotové přehříváky, apod.) a trysky pro rozstřikování suspenze by byly umístěny v jejich blízkosti, je nutno jako reagent využít čpavek, aby nedocházelo k nánosům krystalické močoviny na teplosměnné plochy. V případě, že teplotní okno je ve volném prostoru, je možné provést volbu reagentu mezi čpavkem a močovinou. Močovina se obvykle používá ve spalovacích zařízeních s výkonem nižším než $50 \text{ MW}_{\text{tep}}$.

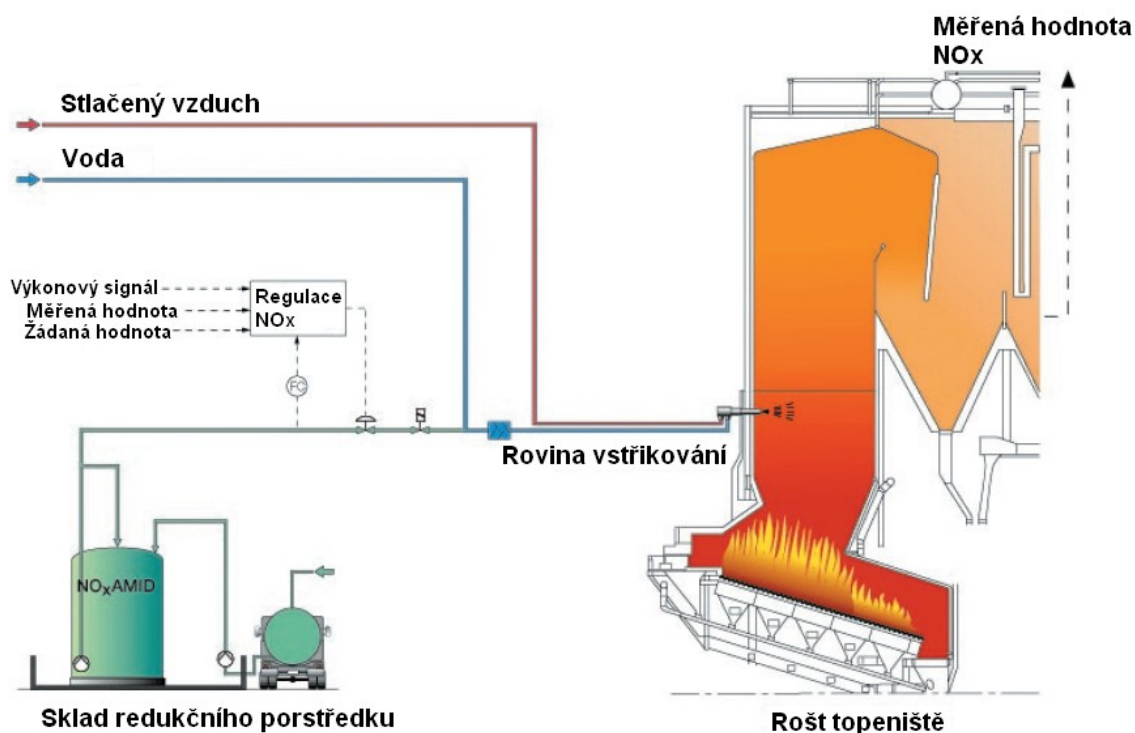
Ve vodě rozpuštěná močovina se může štěpit na reaktivní radikály teprve tehdy, když se voda obklopující částice močoviny zcela odpaří. Pomocí velikosti vodních kapek a z toho vyplývající hloubky proniknutí může být předem stanoveno místo ve spalínách, kde se mají odehrávat reakce. Je-li vodní kapička dostatečně velká, může být pro místo vstříku, vybráno i místo s vyššími teplotami, než jaké jsou vhodné pro redukci NO_x , protože vlastní reakce proběhne dále po proudu spalín v oblasti s nižší teplotou. Naproti tomu u zařízení, kde se používá čpavková voda, se čpavek vypařuje do spalín bezprostředně po vstupu do kotle, jak je vidět na *obr. 9*.

Vzhledem k tomu, že ze čpavkové vody se uvolňuje NH_3 jako plyn, není potřeba tak vysokých teplot pro konverzi NH_3 na NH_2 , který potom reaguje s NO_x . U roztoku močoviny je radikál NH_2 vázán silněji, takže molekulu močoviny je nutné tepelně rozložit na NH_2 a CO . Tento proces je energeticky náročnější, což je důvod pro vstřikování močoviny do vyšších teplot.

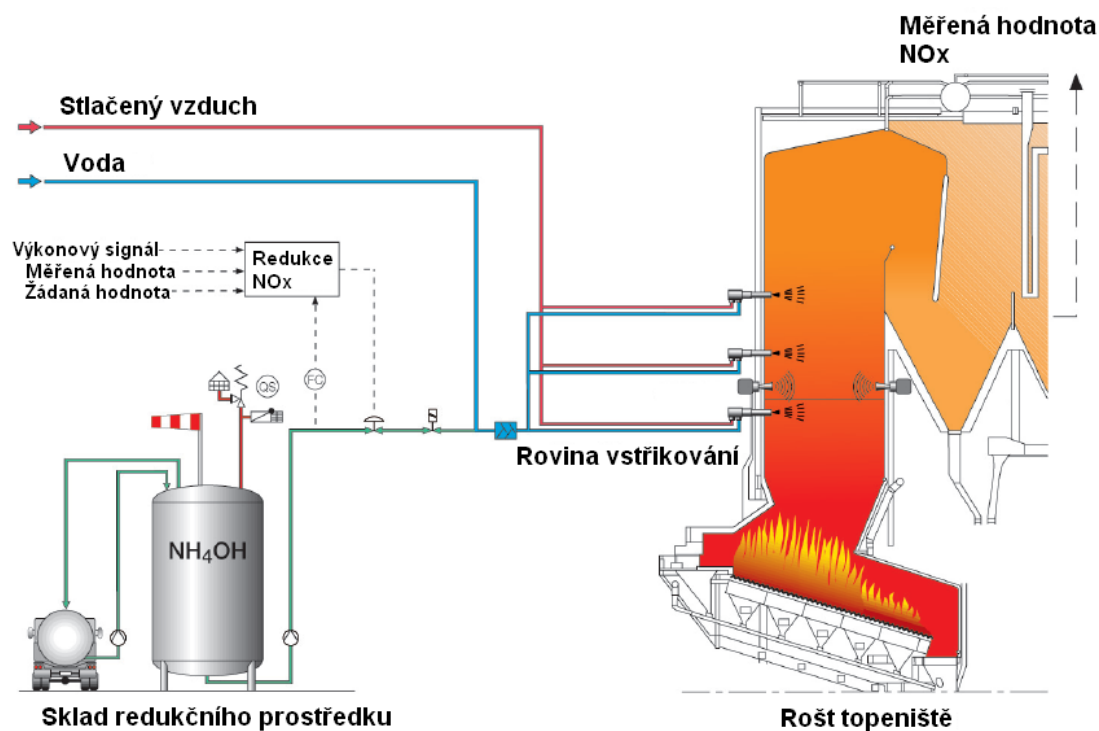


Obr. 9. Srovnání vylučování NO_x při použití močoviny a čpavkové vody [4]

Plnění skladovacích nádrží s roztokem močoviny se provádí pomocí tlakového vzduchu, který vyrábí kompresory umístěné v dodávkových vozidlech, jak je vidět na obr. 10. Pro čpavkovou vodu není tato metoda přípustná. V tomto případě musí být čpavkové páry ze zásobní nádrže odsáty zpět do dodávkového vozidla (obr. 11).



Obr. 10. Schéma procesu standardního zařízení s roztokem močoviny [4]



Obr. 11. Schéma procesu standardního zařízení s čpavkovou vodou [4]

5.2.3 Selektivní katalytická redukce (SCR)

Proces selektivní katalytické redukce je v Evropě a dalších zemích světa, jako je Japonsko a Spojené státy, široce uplatňovaným pochodem k reakci oxidů dusíku ve výstupních plynech z velkých spalovacích zařízení.[5]

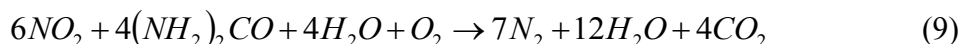
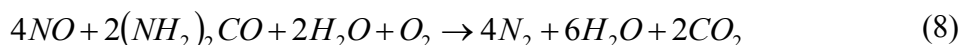
Je založena na stejných chemických reakcích jako předcházející nekatalytická redukce (kapitola 5.2.1), odehrávajících se v omezeném teplotním okně, které však díky přítomnosti katalyzátorů leží mimo rozsah topeniště potažmo kotle. Tyto reakce probíhají za teplot 300 až 400 °C. Redukční činidlo je vstřikováno do spalin, které jsou následně zavedeny do katalyzátorového reaktoru, ve kterém se oxidy dusíku obsažené ve spalinách opět změny na dusík a vodní páru dle reakcí (6) až (9), (obr. 12).

Redukce probíhá dle následujících reakcí:

1. S čpavkem jako redukčním činidlem:

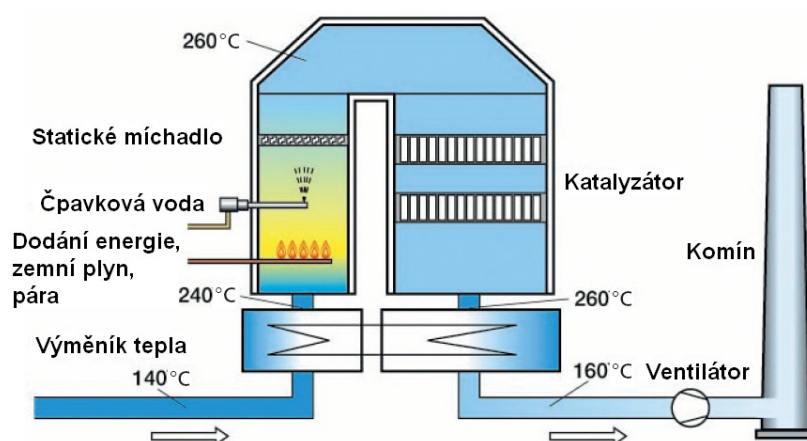


2. S močovinou jako redukčním činidlem:



Hlavní rozdíl mezi technologií užívající vodný roztok močoviny a čpavku je konstrukce nádrže a čerpadel. Čpavek je obecně toxický, výbušný a jednoduše rozpustný ve vodě při běžné teplotě a tlaku. Skladuje se při tlaku okolo 10^6 Pa a teplotě 20°C . Se stoupající teplotou se čpavek z vody poměrně rychle odpařuje. Z tohoto důvodu se musí při návrhu technologie dodržet velice přísné bezpečnostní předpisy. Bezpečnostní předpisy zahrnují provedení technologických prvků, jako jsou např.: snímače čpavku, indikátor směru větru (vlajka nebo rukávec), hořák pro spálení přebytečného plynného čpavku (pro případ přetlaku v nádrži), podtlakový ventil (pro případ podtlaku), potrubí pro odčerpání plynu během plnění, sprchu s pitnou vodou pro případ zasažení čpavkem apod.

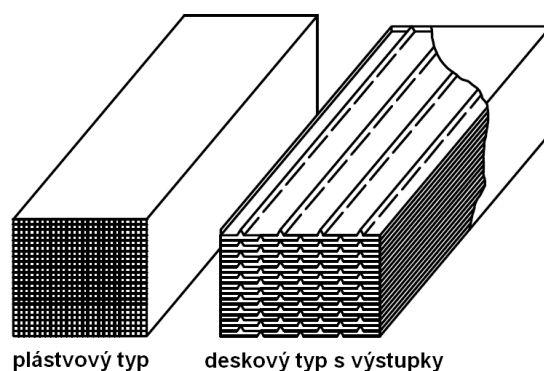
Při využití močoviny, jako regentu, je situace poněkud jiná. Vzhledem k chemické vazbě čpavku na molekuly močoviny, se roztok močoviny může zahřívat až na 106°C , aniž by došlo k odpařování čpavku. Tepelný rozklad močoviny začíná od teplot 130°C a svého maxima dosahuje kolem 380°C . Takto vysokých teplot není nikdy při skladování močoviny dosaženo, proto není za potřeby takových bezpečnostních opatření jako pro čpavkovou vodu.



Obr. 12. Schéma procesu zařízení SCR po suchém čištění spalin [4]

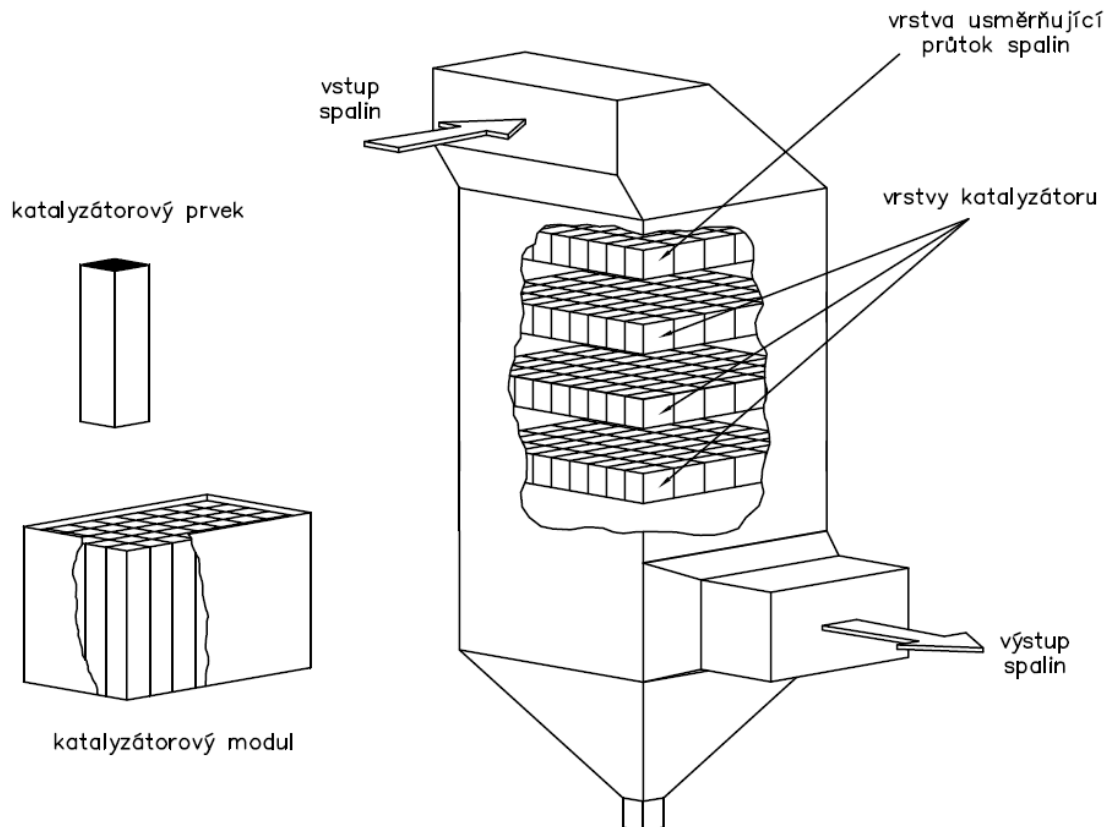
Při konstrukci SCR katalyzátorů je nutné dodržet několik základních požadavků. Nosná konstrukce musí být konstruována jako podpora pro jednotlivé bloky katalyzátorů. Tato nosná konstrukce musí dále umožňovat tepelnou dilataci ve třech směrech v důsledku teplotní roztažnosti, dále jednoduchou montáž, demontáž a výměnu jednotlivých bloků katalyzátoru.

Využívané katalyzátory mohou mít rozličnou strukturální podobu, např. jako medové plástve nebo deskové typy (obr. 13). Jejich cena je poměrně vysoká a životnost naopak poměrně nízká. Jsou složitější na instalaci do stávajících zařízení než SNCR.



Obr. 13. Katalyzátory typu medových pláství a deskové

Katalyzátory se vyrábějí v paletě různých průměrů průchodných kanálů. Volba průměru průchodů se optimalizuje podle charakteristik prachu ve výstupním plynu a povolené tlakové ztráty při prostupu reaktorem SCR. Zátěž prachem by se měla minimalizovat a tlaková ztráta by měla být co nejnižší. Objem katalyzátoru závisí na charakteristikách vlastního katalyzátoru, jako je aktivita a na provozních podmínkách, jako je objem spalín, požadované snížení NO_x , složení plynu a teplota spalín. Jednotlivé prvky katalyzátoru se složí dohromady do formy katalyzátorového modulu, který následně vytvoří katalyzátorové vrstvy, jak je vidět na obr. 14.[5]

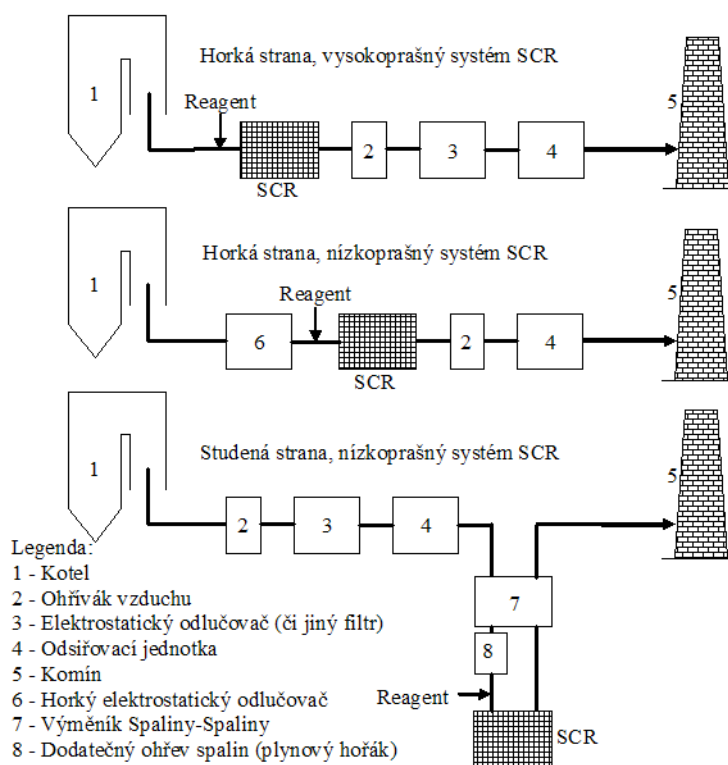


Obr. 14. Uspořádání reaktoru s katalyzátorem

Typy materiálů, které se používají jako katalyzátory pro selektivní katalytickou redukci: [5]

- Oxidy těžkých kovů, jejichž základ tvoří TiO_2 společně s aktivními složkami vanadu, wolframu, molybdenu, mědi a chromu. Ve většině případů se využívá oxid vanadičny (V_2O_5) s malým množstvím oxidu wolframového (WO_3), který se přidává k rozšíření úzkého rozsahu teplotního rozmezí. Dále se přidává malé množství SiO_2 , aby se stabilizovala struktura. Tento typ katalyzátoru pracuje správně v teplotním rozmezí 300 – 450 °C.
- Zeolity, což jsou krystalické, vysoce porézní přírodní nebo syntetické aluminosilikáty a využívají se v rozsahu teplot 350 – 600 °C.
- Oxidy železa, které obsahují částice oxidů železa v tenkém krystalickém obalu fosforečnanů železa.
- Aktivní uhlí, které obsahuje buď práškovité černé uhlí, nebo hnědé uhlí namíchané s inertními prvky a zpracované do spečených pelet. Díky tepelné nestabilitě aktivního uhlí při vyšších teplotách, se vyžadují nízké provozní teploty okolo 100 – 220 °C.

Existují tři základní konfigurace zabudování reaktoru selektivní katalytické redukce do systému čištění spalných plynů. Přičemž hlavním faktorem bývá, zda podmínky, jako je teplota spalin, jsou pro použití katalyzátoru vhodné. Funkční postavení, ve kterém se katalyzátory umísťují, jsou znázorněny na *obr. 15*.



Obr. 15. Stávající uspořádání u SCR technologii [7]

5.2.3.1 Konfigurace zabudování reaktorů

a) Horká strana, vysokoprašný systém (Hot side, high dust system)

Katalytický reaktor je umístěn za ekonomizérem (EKO) a před ohřívákem vzduchu. Tato varianta se používá nejčastěji v případech, kdy je v této oblasti spalínového traktu vhodná teplota a není za potřebí další zdroj tepla. Hlavní nevýhodou je zatížení reaktoru spalínami s velkým obsahem prachu. Přítomnost prachu ve spalínách sice na jednu stranu odstraňuje úsady (abrazivní efekt částic), ale současně eroduje základní materiál katalyzátoru a působí jako katalytický jed. Prach ve spalínách také zvyšuje požadavky na velikost katalyzátoru. S přicházejícími požadavky také souvisí zástavbové rozměry, které jsou relativně velké.

b) Horká strana, nízkoprašný systém (Hot side, low dust system)

Katalyzátor je umístěn za horký elektrostatický odlučovač. Hlavní výhodou tohoto zařízení je nepřítomnost popele ve spalínách. To minimalizuje abrazi katalyzátoru a také jeho chemické otrávení (deaktivaci), která může být způsobena kontaminací popele čpavkem. Dále je také výhodou, že odloučený prach není kontaminovaný čpavkem, protože popílek je v některých případech přidáván do stavebních hmot a přítomnost čpavku zde není žádoucí. Nevýhodou této varianty je horký elektrostatický odlučovač, který je finančně nákladný. A dále náchylnost katalyzátoru k usazování velmi jemného prachu, který není zachycen odlučovačem a tvorbě úsad síranu amonného $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ a hydrogen síranu amonného $(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$.

c) Studená strana, nízkoprašný systém (Cold side, low dust system)

Katalyzátor je umístěn na konci spalínového traktu. To znamená, že je umístěn za přehřívákem, elektrostatickým filtrem a jednotkou odsíření. Pro tento systém se vžilo označení **tait end** (na konci chvostu). Katalyzátor u této technologie má nejmenší aktivní plochu (objem). Nežádoucí látky, jako jsou oxidy síry a popel, jsou již odstraněny ze spalín před technologií SCR a katalyzátor tak není namáhán abrazí a nedochází k tvorbě úsad. Nicméně teplota spalín je již příliš nízká, takže je nutné v této konfiguraci technologie SCR instalovat dodatečný ohřev spalín. Ohřev spalín je nejčastěji realizován prostřednictvím plynového hořáku. Velkou nevýhodou této konfigurace jsou vysoké náklady na dodatečný ohřev spalín, které jsou v dlouhodobém měřítku vyšší, než úspora při pořízení malého katalyzátoru. Tato varianta je využívána často u kotlů, kde z prostorových důvodů není možné aplikovat předchozí dvě varianty a také je velice často využívána u spaloven odpadu, kde je nutné důsledně odstranit všechny kyselinotvorné plyny.

SCR technologie vždy obsahuje následující základní komponenty bez ohledu na konfiguraci systému.:

- 1) zásobní nádrž pro čpavek, čpavkovou vodu nebo roztok močoviny
- 2) vstřikovací trysky
- 3) SCR reaktor

Možná nevýhoda metody SCR se vztahuje k úniku čpavku. Ten nastává následkem neúplné reakce NH_3 s NO_x , když reaktor opouštějí malá množství čpavku spolu se spaliny. Tento jev je známý také jako strhávání čpavku nebo-li čpavkový skluz. Únik čpavku se zvyšuje se vzrůstajícím podílem NH_3/NO_x a se snížením aktivity katalyzátoru a může způsobovat:

- Tvorbu síranu amonného, který se ukládá v dále zařazených zařízeních.
- NH_3 v odpadní vodě z odsiřování spalin a zvýšenou koncentraci v popílku.

Deaktivace katalyzátoru nastává rychleji, když se spaluje palivo s vysokým obsahem alkálií (hlavně draslíku) např. biomasa, tuhých částic (popel) a sloučenin (např. oxidů síry). Dochází k zanesení a znehodnocení katalytického lože. Což ve své podstatě vede ke snížení účinnosti a zvýšení tlakové ztráty. Katalyzátor je možné regenerovat propíráním vodou anebo kyselinou sírovou, k čemuž je ale třeba vyjmout katalyzátor ze systému.

Hlavní výhody selektivní katalytické redukce:

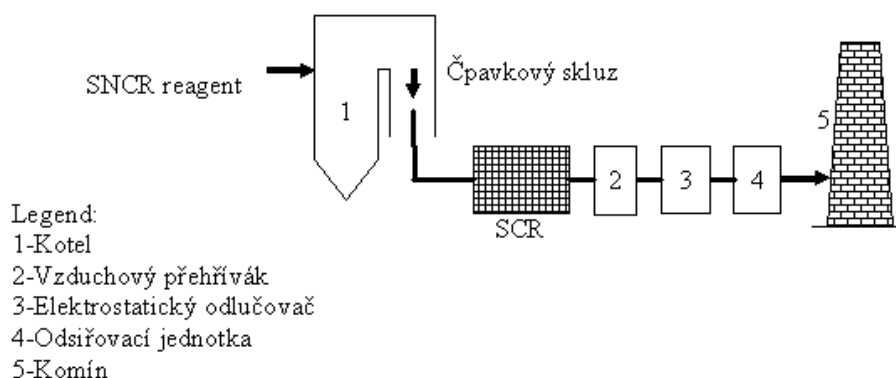
- Může se používat pro širokou paletu paliv při procesech spalování.
- Konverze NO_x nevytváří složky druhotného znečištění.
- Podíl snížení NO_x při selektivní katalytické redukci závisí na snížení NO_x , kterého se dosáhne zařízením primárních opatření v topeništi.

Účinnost snížení NO_x je vyšší než u selektivních nekatalytických redukcí a pohybuje se okolo 80 až 95 %. Elektrická spotřeba pro tuto metodu je ca. 0,5 % vyrobené energie. Investiční náklady na zařízení SCR, které jsou vynaloženy ke snížení NO_x v čistém plynu, obnášejí podle stupně velikosti, stupně snížení dusíku a technického vybavení zhruba pětinasobek nákladů u srovnatelného zařízení SNCR. K tomu přistupují vyšší provozní náklady kvůli vyššímu výkonu ventilátoru k překonání tlakové ztráty v přídavných výměnících tepla a katalyzátoru, jakož i znovuohřívání spalin.

5.2.4 Technologie SNCR/SCR

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [7]

Tato technologie je kombinací klasické SNCR technologie a SCR technologie. Reagent je vstřikován do spalovací komory zcela identicky, jako by se jednalo pouze o technologii SNCR. Rozdíl je pouze v tom, že je reagent vstřikován s větším stechiometrickým přebytkem a tedy s čpavkovým skluzem. Tento nezreagovaný čpavek je pak transportován spalinami do oblasti s teplotou okolo 350 – 400 °C, kde je nainstalován SCR reaktor. Tento reaktor využívá čpavkový skluz k dalšímu dodatečnému odstranění NO_x ze spalín. S využitím technologie SCR/SNCR stoupne účinnost až na 80 – 85 % při nízkém finálním čpavkovém skluzu ($5 \text{ mg}/\text{m}_N^3$).



Obr. 16. Základní schéma SNCR/SCR technologie [7]

5.2.5 Obecné porovnání sekundárních opatření ke snížení emisí NO_x

Sekundární opatření	Obvyklý podíl redukce NO _x	Ostatní parametry provedení	
		parametr	hodnota
Selektivní katalytická redukce (SCR)	80 – 95 %	provozní teplota	320 – 420 °C (VP) 260 – 320 °C (KP)
		redukční činidlo	čpavek, močovina
		podíl NH ₃ /NO _x	0,8 – 0,1
		únik NH ₃	2 – 10 mg/m_N^3
		využitelnost reagentu	ca. 99 %
		podíl konverze SO ₂ /SO ₃ v katalyzátoru	1,0 – 1,5 % (KP)
		spotřeba energie v % elektrického výkonu	0,2 % (VP) 5 % (KP)
		tlaková ztráta v katalyzátoru	400 – 1000 Pa
		nosné médium	voda nebo bez media

Sekundární opatření	Obvyklý podíl redukce NO _x	Ostatní parametry provedení	
		parametr	hodnota
Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)	30 – 50 %	provozní teplota	850 – 1100 °C
		redukční činidlo	čpavek, močovina
		podíl NH ₃ /NO _x	1,5 – 2,5
		únik NH ₃	5 – 20 mg / m ³ _N
		využitelnost reagentu	ca. 60 %
		spotřeba energie v % elektrického výkonu	0,1 – 0,3 %
		čas prodlevy v teplotním pásmu	0,2 – 0,5 s
		nosné médium	voda, pára, vzduch
Poznámky: VP – vysoce prašný systém, KP – koncový plyn			

Tab. 2. Parametry jednotlivých sekundárních opatření

6 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO DENITRIFIKACI SPALIN VE FLUIDNÍM KOTLI

Úkolem je navrhnout zařízení pro denitrifikaci spalin ve fluidním kotli Teplárny Strakonice s využitím metody SNCR.

6.1 Všeobecné informace o fluidních kotlích

Ve fluidním ohništi se spaluje drcené palivo v kypící fluidní vrstvě, která se vytvoří průchodem spalovacího vzduchu a spalin mezi tuhými částicemi paliva, popela a aditiva, když nastane rovnováha gravitačních sil a aerodynamických odporů v mezerách mezi zrny. Spalovací vzduch vstupuje do spodní části ohniště otvory ve dnu spalovacího prostoru. Palivo se přivádí pneumaticky nebo šnekovým pohonem taktéž do spodní části ohniště. Větší částice paliva se spalují ve spodní zúžené části spalovacího prostoru s vyšší rychlostí vzduchu. Celý proces má omezenou stabilitu, která je určena fluidní rychlostí danou průtokem vzduchu, granulometrií částic a vlastnostmi vrstvy. Je-li průtok vzduchu příliš malý, vrstva si sedne a hrozí její spečení, naopak při příliš vysokém průtoku může dojít k odfouknutí vrstvy z ohniště.

Charakteristické rysy tohoto druhu spalování jsou zejména:

- Velmi intenzivní přenos hmoty a tepla uvnitř vrstvy, způsobené vířivým pohybem částic. To umožňuje zmenšení velikosti výhřevných ploch, celkových rozměrů kotle a vysoké vyhoření paliva (až 98 %).
- Nižší spalovací teploty (700 – 900 °C) a odstupňovaný přívod vzduchu do ohniště, čímž se několikanásobně snižuje tvorba oxidů dusíku a síry. Lze zde spalovat i méněhodnotná paliva s vysokým obsahem síry. Při těchto teplotách

nedochází ke spékání popela. Nízké teploty se dosahuje tím, že se použije paliv s nízkou výhřevností, že se spalovací vzduch ohřívá na nízkou teplotu (nebo se neohřívá vůbec) a že se z fluidizované vrstvy odvádí dostatečné množství tepla.

Ve fluidních ohništích je možno spalovat i kapalná a plynná paliva. Fluidní vrstvu je pak nutno vytvořit uměle pomocí popelovin nebo aditiv. Jako aditivum se může používat např. křemičitý písek. Hlavní nevýhodou fluidního ohniště je značná složitost a náročnost na obsluhu a údržbu. Pro malé kotle jsou cena zařízení a provozní náklady většinou neúnosné a dává se přesnost spalování na roštu.

6.1.1 Výhody fluidních kotlů

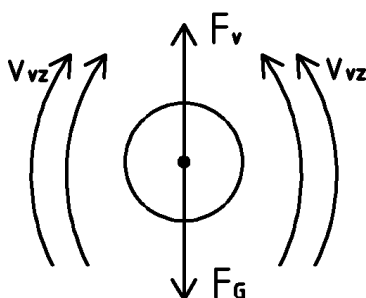
1. Dochází k menší produkci oxidů síry ve spalínách. Síra se váže na vápenné složky popelovin a odsíření je možno zvýšit přívodem drceného vápence do fluidní vrstvy. Dávkování vápence se uskutečňuje na základě molového poměru Ca/S a volí se v rozmezí 1,5 – 3,5. Vzniklý síran a siřičitan vápennatý v podobě tuhých částic a popílek jsou potom zachycovány v odlučovačích tuhých částic. Vzhledem k velmi jemným frakcím tuhých částic je nutné k jejich zachycení použít textilních nebo elektrostatických odlučovačů. Optimální teplota pro odsíření je 850 – 900 °C. Účinnost odsíření je od 40 do 60 % podle typu kotle a množství dávkovaného vápence. Tato účinnost je závislá na:
 - Obsahu síry v palivu
 - Kvalitě vápence
 - Homogenitě fluidní vrstvy
 - Době pobytu ve fluidním reaktoru
2. Fluidní kotel nevyžaduje budování odsiřovacího zařízení za kotlem.
3. Spalování probíhá s vyšším zatížením roštové plochy oproti klasickým roštovým kotlům a rozměry roštu proto vycházejí menší.
4. Mají nižší komínovou ztrátu, neboť odsířené spaliny na konci kotle mohou mít v důsledku nižšího rosného bodu nižší teplotu. Účinnost kotlů bývá při jmenovitých parametrech 92 – 94 %.

6.1.2 Síly působící na částice ve fluidní vrstvě

Jestliže silové účinky plynu proudícího vzhůru fluidní vrstvou vyrovnají působení gravitace na jednotlivé částice vrstvy, nastane práh (počátek) fluidizace. S rostoucí rychlostí plynné fáze vrstva postupně expanduje (řídne) a prochází několika režimy. Nejčastěji se u fluidních kotlů vyskytuje:

- a) bublinová fluidizace
- b) turbulentní fluidizace

Pokud je zaveden zjednodušující předpoklad, že fluidní vrstva má podobné vlastnosti jako kapalina. Mohou se síly působící na jednotlivé částice zapsat zjednodušeným způsobem pomocí rovnic (10) a (11).



Obr. 17. Síly působící na částici ve fluidní vrstvě

$$F_G = V_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot g \quad [N] \quad (10)$$

$$F_v = 3 \cdot \pi \cdot \eta_{vz} \cdot d_{\epsilon} \cdot v_{vz} \quad [N] \quad (11)$$

, kde: V_{ϵ} ...je objem částice [m^3]

ρ_{ϵ} ...hustota částice [kg/m^3]

gje gravitační zrychlení [m^2/s]

η_{vz} ...je dynamická viskozita vzduchu [$Pa \cdot s$]

d_{ϵ} ...je průměr částice [m]

v_{vz} ...je rychlost proudění vzduchu [m/s]

V případě, že síly působící na částici (tíhová F_G a vztlačková F_v), se navzájem rovnají, nachází se částice v tzv. rovnovážném stavu a nestoupá ani neklesá fluidní vrstvou.

6.1.3 Dělení fluidních kotlů

Dělení fluidních kotlů je závislé na rychlosti proudění a fyzikálních vlastnostech fluidizačního vzduchu a spalin, složení částic pevné fáze, tvaru a měrné hmotnosti částic, tvaru a velikosti kotle, velikosti a typu fluidního roštu a dalších činitelích. Jednotlivé typy kotlů produkují různé množství NO_x a mají rozdílný stupeň odsíření, který se určuje ze vztahu (12).

Základní rozdělení fluidních kotlů:

- a) Kotle se stacionární fluidní vrstvou
- b) Kotle s cirkulující fluidní vrstvou

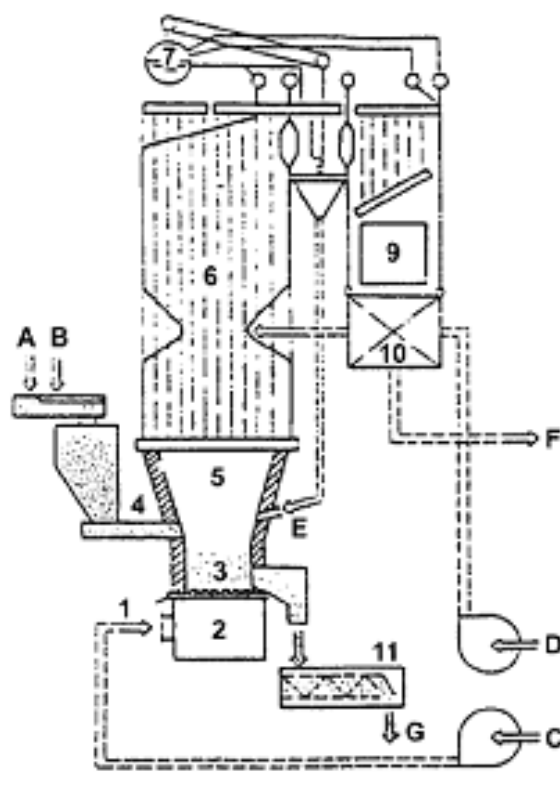
$$\circ S = \frac{SO_{2t} - SO_{2sk}}{SO_{2t}} \quad [1] \quad (12)$$

, kde: SO_{2t}je teoretická koncentrace SO_2 ve spalínách vypočtená z obsahu spalitelné síry v palivu

SO_{2sk} ...je skutečná naměřená koncentrace SO_2 ve spalínách

6.1.3.1 Atmosférické fluidní kotle se stacionární (bublinkující) fluidní vrstvou (AFB)

Charakteristickým rysem těchto kotlů je bublinkující fluidní vrstva se zřetelnou hladinou. Spalování probíhá za tlaku přibližně stejném, jako je v okolní atmosféře. První typy těchto kotlů vznikly z rekonstruovaných klasických roštových kotlů. Jeden z příkladů fluidního kotle se stacionární fluidní vrstvou je zobrazený na *obr. 18*.

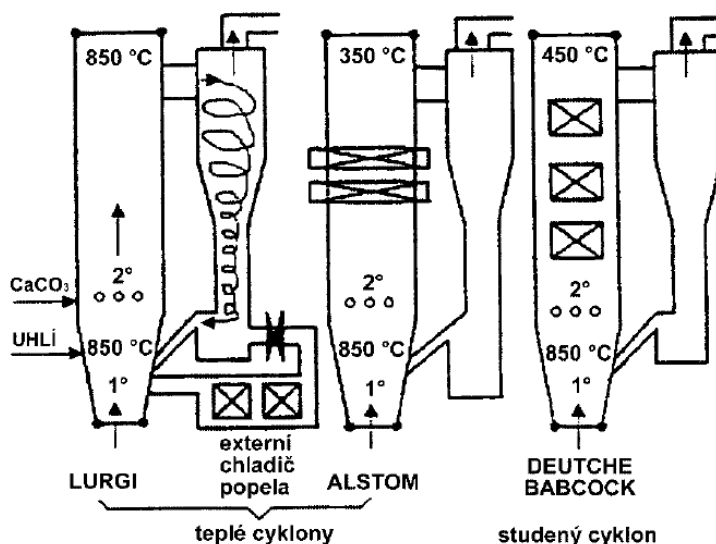


- A, B – palivo a aditivům
- C – primární vzduch
- D – sekundární vzduch
- E – návrat zachyceného popílku
- F – výstup spalín
- G – odvod tepla
- 1 – fluidní rošt
- 2 – vzduchová komora
- 3 – Fluidní vrstva
- 4 – podavač
- 5 – fluidní reaktor
- 6 – spalovací komora
- 7 – buben
- 8 – přehřívák páry
- 9 – ohřívák vody
- 10 – ohřívák vzduchu
- 11 – chlazený dopravník popela

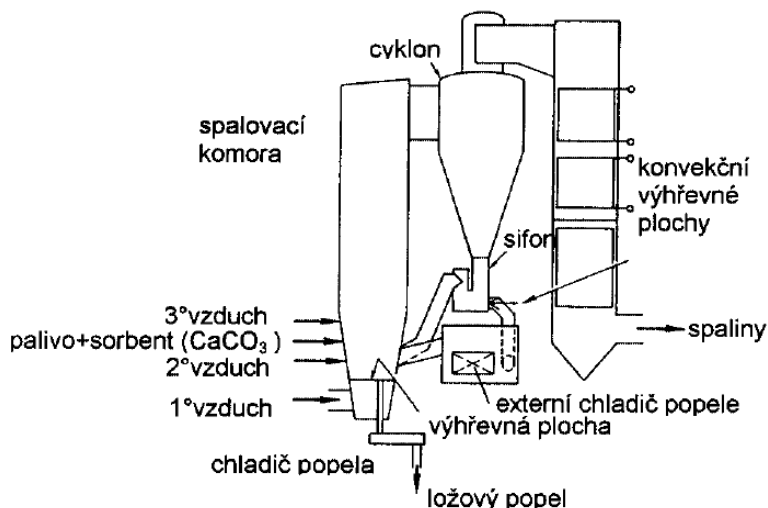
Obr. 18. Fluidní ohniště typu DUKLAFLUID [6]

6.1.3.2 Atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB)

Společným znakem těchto kotlů je prostup všech spalín z ohniště přes cyklony, jak je vidět na *obr. 19* a *20*. V nich se odstředivou silou odloučí největší částice, které se potom znovu vrací do fluidního ohniště. Výhodou je delší pobyt částic ve spalovacím prostoru, který vede k lepšímu odsíření i vyhoření uhlíku (snížení ztráty mechanickým nedopalem). Na rozdíl od předešlých kotlů AFB není u těchto kotlů zřetelná hladina fluidní vrstvy, která naopak expanduje do prostoru ohniště.



Obr. 19. Principiální typy kotlů s cirkulující fluidní vrstvou [6]



Obr. 20. ACFB s externím chladičem [6]

Kromě fluidních kotlů typu AFC a ACFB se v poslední době uplatňují ještě kotle s tlakovou fluidní vrstvou (PCFB). Tlak 1,2 – 1,6 MPa, který je v ohništi, příznivě působí na snížení emisí NO_x a snižuje obestavěný prostor kotle. Zvyšuje se účinnost spalování.

6.1.4 Měření na fluidních kotlích

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [9]

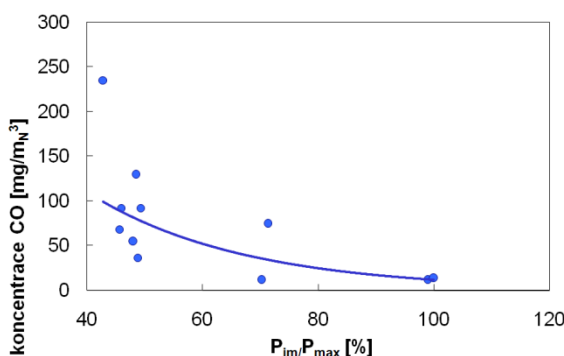
Na fluidních kotlích jsou zpravidla prováděna měření koncentrací plyných složek spalin ve třech oblastech:

1. ve spalovací komoře
2. za poslední teplosměnnou plochou
3. před vstupem do komína

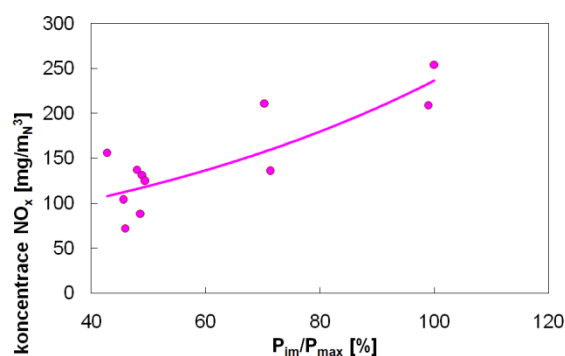
Ad. 1. Výsledky měření základních plyných složek spalin (CO , NO_x a zejména O_2) dávají informace o dokonalosti spalování a distribuci spalovacího vzduchu. Tato měření se provádějí (dle prostorových možností) na několika úrovních po výšce spalovací komory. Takto vytvořené koncentrační pole slouží k případnému seřízení spalovacího režimu nebo k návrhům možných konstrukčních úprav kotle.

Ad. 2. Výsledky měření koncentrace plyných složek spalin za poslední teplosměnnou plochou slouží jako vstupní hodnoty výpočtu účinnosti ke stanovení příslušných ztrát (komínová a chemickým nedopalem). Protože kouřové kanály a konce zadních tahů bývají velkých rozměrů a koncentrační profil není rovnoměrný, provádí se měření sítovou metodou a do výpočtu vstupují průměrné hodnoty měřených veličin.

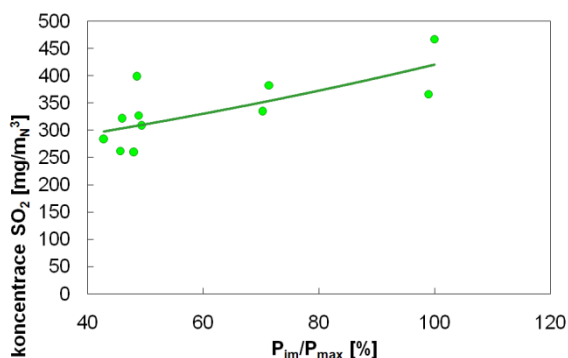
Ad. 3. Hodnoty koncentrací plyných složek spalin před vstupem do komína jsou důležité z hlediska dodržení platných emisních limitů a dávají informace o celkové úrovni plyných emisí vypouštěných do ovzduší. Protože úroveň koncentrace plyných emisí pod hranicí emisních limitů je jednou z garantovaných hodnot výrobců kotlů, bývá tato oblast v průběhu měření často středem zájmu všech zúčastněných stran. Příklady výsledků měření emisí na fluidním kotli s cirkulující fluidní vrstvou v této oblasti měření jsou zobrazeny na grafu 5 až 7.



Graf. 5. Naměřené hodnoty emisí CO na výstupu z FK při P_{fm}/P_{max} [9]



Graf. 6. Naměřené hodnoty emisí NO_x na výstupu z FK při P_{fm}/P_{max} [9]



Graf. 7. Naměřené hodnoty emisí SO_2 na výstupu z FK při P_{im}/P_{max} [9]

6.2 Základní údaje o společnosti Teplárna Strakonice, a.s.

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [3].

Teplárna Strakonice, a.s. provozuje v lokalitě města soustavu zásobování teplem. Patří mezi zdroje, které využívají po desetiletí osvědčenou energetickou technologii, tzv. kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie – KVET. Provozování této technologie významně přispívá ke snížení imisního zatížení v lokalitě města Strakonice a je jedním z nejlepších způsobů využití paliva. Tato energeticky a ekologicky velmi přínosná technologie však v České republice není dostatečně podporována, na rozdíl od silné podpory některých problematických obnovitelných zdrojů energie.

Kogenerační jednotky pro výrobu energie jsou ekonomicky realizovatelné pro mnohem menší velikosti zařízení, než jsou kondenzační elektrárny. Jsou také zvláště vhodné pro spalování biomasy. U menšího závodu se může palivo hromadit na menším prostoru, což napomáhá udržet na nízké úrovni náklady dopravy a přepravy paliva, které jsou u biomasy obvykle hlavní nákladovou položkou. Z toho vyplývá menší dopad na životní prostředí.

6.3 Popis řešeného kotle

Kotel je vodotrubný s přirozenou cirkulací a jedním bubnem. Je tvořen membránovými stěnami, které kromě základní funkce slouží zároveň jako nosná konstrukce kotle. Jedná se o kotel se spodním uložením, kdy celý tlakový systém kotle dilatuje volně do stran a směrem nahoru při uvažování jednoho pevného bodu v místě uložení. Celý trubkový systém včetně bubnu je samostatný a nevyžaduje dodatečnou podpůrnou konstrukci. Spalovací komora je z venku opatřena bandáží jako běžný kotel. V druhém tahu kotle jsou umístěny dva svazky přehříváku páry a svazek výparníku, ve třetím tahu je umístěno EKO a LUVO. EKO se skládá z pěti dílu, LUVO ze dvou.

6.3.1 Popis fluidního topeniště

Samotné topeniště se skládá z hlavního lože a dohořivacího lože. Hlavní lože je rozděleno na dvě pole, z nichž menší pole má jednu sekci a větší pole má dvě sekce. Dohořivací lože využívá tepelný potenciál popele a je navrženo přes celou šířku kotle, stejně jako všechny tři sekce hlavního lože. Činnost jednotlivých sekcí je možné plynule regulovat včetně jejich odstavení z provozu.

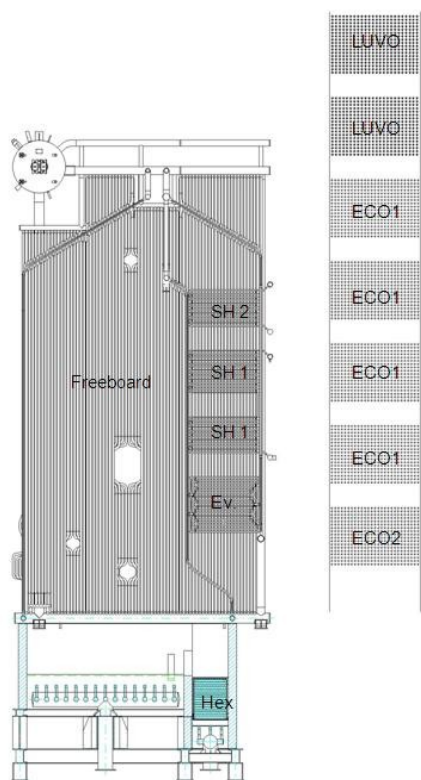
Obě pole mají vstup recirkulace popele, který je přiveden z dohořivacího lože. Všechny sekce hlavního lože mají vlastní přívod primárního vzduchu. Dohořivací lože má rozměr $1 \times 4,9 \text{ m}$ a je v něm uložen svazek výměníku tepla a systém trysek přivádějících primární fluidní vzduch. V celém fluidním topeništi je 276 fluidních trysek.

Výška fluidní vrstvy v hlavním loži je 300 mm a v dohořivacím loži 1500 mm . Cirkulační smyčka tepelného výměníku je zavodňována sytou kapalinou z bubnu a cirkulována čerpadly instalovanými pro tento účel.

Ohřev vzduchu zajišťuje trubkový ohřívák. LUVO tvoří 2 shodné bloky trubkových svazků s trubkami umístěnými ve spalinovém kanále.

6.3.2 Teplosměnné plochy

Umístění jednotlivých teplosměnných ploch a jejich rozměry jsou zobrazeny na *obr. 21*.



- Vložený výparník v dohořivacím loži (HEx) $97,0 \text{ [m}^2\text{]}$
- Spalovací komora $225,2 \text{ [m}^2\text{]}$
- Přehřívák 2 (SH 2) $135,0 \text{ [m}^2\text{]}$
- Přehřívák 1 (SH 1) $292,6 \text{ [m}^2\text{]}$
- Výparník (Ev.) $206,0 \text{ [m}^2\text{]}$
- Ekonomizér 2 (ECO 2) $134,6 \text{ [m}^2\text{]}$
- Ekonomizér 1 (ECO 1) $538,5 \text{ [m}^2\text{]}$
- Ohřívák vzduchu (LUVO) $441,9 \text{ [m}^2\text{]}$

Obr. 21. Umístění teplosměnných ploch ve fluidním kotli [8]

6.3.3 Základní technické parametry kotle

Způsob spalování	fluidní vrstva (stacionární)
Palivo	60 % HU + 40 % biomasa
Jmenovitý parní výkon kotle	36,0 t/h
Maximální parní výkon kotle	40,0 t/h
Tepelný výkon kotle	30,47 MW
Teplota páry	465 °C
Teplota napájecí vody	140 °C
Teplota ve spalovací komoře	850 °C
Bezpečnostní teplota ve spalovací komoře	1000 °C
Tlak na výstupu	6,1 MPa
Účinnost garantovaná	91 %

Tab. 3. Základní parametry kotle [8]

6.4 Složení paliva

Jedná se o palivo, které je dáno směsí dvou paliv a to 60 % hnědého uhlí (HU) a 40 % biomasy. Z této směsi byl vybrán reprezentativní vzorek o složení, které je uvedeno v tab. 4. Jedním z prvořadých záměrů, při spoluspalování hnědého uhlí a biomasy, bylo dosáhnout snížení emisí SO₂ a CO₂. Vlivem snížení množství fosilního paliva (uhlí), klesají emise „fosilního CO₂“, kdežto CO₂, pocházející z biomasy se nehodnotí, protože při spalování biomasy se vyprodukuje stejné množství CO₂, které se spotřebuje při její tvorbě. Dochází k tzv. uzavřenému cyklu CO₂. Měrné emise CO₂ se úměrně snižují se vstupem palivové biomasy. Snížení oxidu uhličitého je obvyklým argumentem ve prospěch spoluspalování biomasy dokonce, i když by třeba mohly poněkud vzrůst emise do ovzduší z ostatních složek.

Popis	Označení	Hodnota	Jednotka
uhlík	C^r	33,92	%
vodík	H^r	3,48	%
síra	S^r	0,51	%
kyslík	O^r	18,83	%
dusík	N^r	0,35	%
voda	w^r	33,24	%
popelovina	A^r	9,69	%
výhřevnost	Q_i^r	12,45	MJ/kg

Tab. 4. Složení paliva v surovém stavu [8]

6.4.1 Parametry spalin

Následující údaje o provozních podmínkách stanovují základní rámec pro návrh procesu a koncepci systému SNCR. Všechny hodnoty jsou udány pro referenční podmínky (0 °C, 101325 Pa, suchý plyn) není-li uvedeno jinak. Všechny hodnoty emisí jsou vztaženy na 6% O₂ a normální stav plynu, není-li uvedeno jinak.

V tab. 5 jsou uvedeny pouze maximální a minimální hodnoty výkonu kotle. Tyto výkonové hladiny jsou z hlediska spotřeby a provozu technologie SNCR hraniční.

Popis	Jednotka	Výkon kotle 40 t/h	Výkon kotle 18 t/h
palivo	<i>l</i>	60 % uhlí a 40 % dřevní štěpky	
Množství spalin na výstupu z kotle	m_N^3/h , vlhké	54212	25584
	m_N^3/h , suché	45336	21553
	m_N^3/h , 6% O ₂	46382	21086
H ₂ O	vol. %	16,32	15,76
O ₂ v oblasti vstřiku	vol. %	5,66	6,33
CO ₂	vol. %, vlhký	11	10
N ₂	vol. %, vlhký	68	68
SO ₂ bez odsíření	mg/m _N ³	4407	4217
SO ₂ s odsířením	mg/m _N ³	1542	1676
HCl max.	mg/m _N ³	23	22
HF max.	mg/m _N ³	39	37
CO	mg/m _N ³ , 6% O ₂	13	12
Vstupní hodnota NO _x	mg/m _N ³ , 6% O ₂	250 - 300	250 – 300
Požadovaná hodnota NO _x	mg/m _N ³ , 6% O ₂	200	200

Tab. 5. Parametry spalin [8]

6.5 Stechiometrický výpočet pro výkon kotle 40 t/h (objemově)

Výpočet byl proveden dle vzorců (13) až (35) v programu Microsoft Excel 2007. Výsledky jsou uvedeny v tab. 7 a 8. Soubor s výpočtem je na příloženém CD.

Množství kyslíku potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva:

Příslušné hodnoty uvedené v tab. 4 byly dosazeny do rovnice (13).

$$V_{O_2} = \frac{22,39}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + \frac{22,39}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,39}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} - \frac{22,39}{32} \cdot \frac{O^r}{100} \quad [m_N^3 / kg] \quad (13)$$

Množství vzduchu teoretického, suchého potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva:

$$V_{vz,t}^s = \frac{V_{O_2}}{0,21} \quad [m^3 / kg] \quad (14)$$

, kde: $V_{O_2} \dots$ je množství kyslíku ze vztahu (13)

Přebytek vzduchu:

Pro určení přebytku vzduchu, bylo počítáno s hodnotou koncentrace kyslíku ve spalínách v oblasti vstřiku, která je uvedena v *tab. 5*.

$$\alpha = 1 + \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} \cdot \frac{\frac{c_{O_2}}{100}}{0,21 - \frac{c_{O_2}}{100}} \quad [1] \quad (15)$$

, kde: $V_{sp,t}^s \dots$ je množství spalin teoretických, suchých ze vztahu (19)

$c_{O_2} \dots$ je koncentrace kyslíku ve spalínách, která je uvedena v *tab. 5*

$V_{vz,t}^s \dots$ je množství vzduchu teoretického, suchého ze vztahu (14)

Množství vzduchu skutečného, suchého potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva:

$$V_{vz,sk}^s = V_{vz,t}^s \cdot \alpha \quad [m^3 / kg] \quad (16)$$

, kde: $V_{vz,t}^s \dots$ je množství vzduchu teoretického, suchého ze vztahu (14)

$\alpha \dots$ je přebytek vzduchu, vypočtený dle rovnice (15)

Součinitel zvětšení objemu spalin vzdušnou vlhkostí v přivedeném spalovacím vzduchu:

$$\nu = 1 + \varphi \cdot \frac{p_p''}{p_{bar} - \varphi \cdot p_p''} \quad [1] \quad (17)$$

, kde: $\varphi \dots$ je relativní vlhkost a má hodnotu 0,8 [1]

$p_{bar} \dots$ je atmosférický tlak, jeho hodnota je 99800 [Pa]

$p_p'' \dots$ je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu.

Jeho hodnoty jsou uvedeny v *tab. 6*. Bylo počítáno s teplotou vzduchu 20 °C.

$t_{vz} [^{\circ}C]$	0	10	20	30	40	50
$p_p'' [Pa]$	610,8	1227,7	2336,8	4241,6	7374,2	12331,6

Tab. 6. Parciální tlak vodní páry na mezi sytosti pro danou teplotu vzduchu

Množství vzduchu skutečného, vlhkého potřebného k dokonalému spálení 1 kg paliva:

$$V_{vz,sk}^v = V_{vz,sk}^s \cdot v \quad [m^3 / kg] \quad (18)$$

, kde: $V_{vz,sk}^s$... je množství vzduchu skutečného, suchého ze vztahu (16)

v je součinitel zvětšení objemu spalín vzdušnou vlhkostí ze vztahu (17)

Množství spalín teoretických, suchých vzniklých po spálení 1 kg paliva:

Příslušné hodnoty uvedené v *tab. 4.* byly dosazeny do rovnice (19).

$$V_{sp,t}^s = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} + \frac{22,4}{28,014} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \quad [m^3 / kg] \quad (19)$$

, kde: $V_{vz,t}^s$... je množství vzduchu teoretického, suchého ze vztahu (14)

Množství spalín skutečných, suchých vzniklých po spálení 1 kg paliva:

$$V_{sp,sk}^s = V_{sp,t}^s + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [m^3 / kg] \quad (20)$$

, kde: $V_{sp,t}^s$... je množství spalín teoretických, suchých ze vztahu (19)

α je přebytek vzduchu ze vztahu (15)

$V_{vz,t}^s$... je množství vzduchu teoretického, suchého ze vztahu (14)

Množství vodní páry ve spalínách vzniklý po spálení 1 kg paliva:

Příslušné hodnoty uvedené v *tab. 4* byly dosazeny do rovnice (21).

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2,016} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,144} \cdot \frac{w^r}{100} + (v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s \quad [m^3 / kg] \quad (21)$$

, kde: v je součinitel zvětšení objemu spalín vzdušnou vlhkostí ze vztahu (17)

$V_{vz,sk}^s$... je množství vzduchu skutečného, suchého ze vztahu (16)

Množství spalín skutečných, vlhkých vzniklých po spálení 1 kg paliva:

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} \quad [m^3 / kg] \quad (22)$$

, kde: $V_{sp,sk}^s$... je množství spalín skutečných, suchých ze vztahu (20)

V_{H_2O} ... je množství vodní páry ve spalínách ze vztahu (21)

Koncentrace jednotlivých složek v teoretických suchých spalínách po spálení 1 kg paliva:

$$CO_2 = \frac{\frac{22,26}{12,01} \cdot C^r}{V_{sp,t}^s} \quad [\%] \quad (23)$$

$$SO_2 = \frac{\frac{21,86}{32,06} \cdot S^r}{V_{sp,t}^s} \quad [\%] \quad (24)$$

$$N_2 = \frac{\frac{22,4}{28,014} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp,t}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (25)$$

Koncentrace jednotlivých složek ve skutečných suchých spalínách po spálení 1 kg paliva:

$$CO_2 = \frac{\frac{22,26}{12,01} \cdot C^r}{V_{sp,sk}^s} \quad [\%] \quad (26)$$

$$SO_2 = \frac{\frac{21,86}{32,06} \cdot S^r}{V_{sp,sk}^s} \quad [\%] \quad (27)$$

$$N_2 = \frac{\frac{22,4}{28,014} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s}{V_{sp,sk}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (28)$$

$$O_2 = \frac{(\alpha - 1) \cdot 0,21 \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp,sk}^s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (29)$$

Koncentrace jednotlivých složek ve skutečných vlhkých spalínách po spálení 1 kg paliva:

$$CO_2 = \frac{\frac{22,26}{12,01} \cdot C^r}{V_{sp,sk}^v} \quad [\%] \quad (30)$$

$$SO_2 = \frac{\frac{21,86}{32,06} \cdot S^r}{V_{sp,sk}^v} \quad [\%] \quad (31)$$

$$N_2 = \frac{\frac{22,4}{28,014} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,79 \cdot V_{vz,sk}^s}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (32)$$

$$O_2 = \frac{(\alpha - 1) \cdot 0,21 \cdot V_{vz,t}^s}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (33)$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp,sk}^v} \cdot 100 \quad [\%] \quad (34)$$

6.6 Stechiometrický výpočet pro výkon kotle 18 t/h (objemově)

Tento výpočet byl proveden stejným způsobem jako v kapitole 6.5. Výsledky jsou uvedené v tab. 7 a 8.

Popis	Označení	Hodnota		Jednotka
		Výkon kotle 40 t/h	Výkon kotle 18 t/h	
množství kyslíku	V_{O_2}	0,697	0,697	m_N^3 / kg
množství vzduchu teoretického, suchého	$V_{vz,t}^s$	3,321	3,321	m_N^3 / kg
přebytek vzduchu	α	1,362	1,423	1
množství vzduchu skutečného suchého	$V_{vz,sk}^s$	4,523	4,727	m_N^3 / kg
součinitel zvětšení objemu spalín	ν	1,019	1,019	1
množství vzduchu skutečného vlhkého	$V_{vz,sk}^v$	4,610	4,817	m_N^3 / kg
množství spalín teoretických suchých	$V_{sp,t}^s$	3,259	3,259	m_N^3 / kg
množství spalín skutečných suchých	$V_{sp,sk}^s$	4,461	4,665	m_N^3 / kg
množství vodní páry ve spalínách	V_{H_2O}	0,883	0,887	m_N^3 / kg
množství spalín skutečných vlhkých	$V_{sp,sk}^v$	5,344	5,552	m_N^3 / kg

Tab. 7. Stechiometrický výpočet paliva pro výkony kotle 40 t/h a 18 t/h

Typ spalín		Výkon kotle 40 t/h					Výkon kotle 18 t/h				
		CO ₂	SO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂	SO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
		%					%				
teoretické suché	$V_{sp,t}^s$	19,29	0,11	80,60	0	0	19,29	0,11	80,60	0	0
skutečné suché	$V_{sp,sk}^s$	14,09	0,08	80,17	5,66	0	13,48	0,07	80,12	6,33	0
skutečné vlhké	$V_{sp,sk}^v$	11,76	0,07	66,92	4,72	16,53	11,32	0,06	67,31	5,32	15,98

Tab. 8. Koncentrace jednotlivých složek ve spalínách

6.7 Volba redukčního činidla

Jako reagent pro technologii SNCR v navrhovaném provozu byl zvolen roztok močoviny se speciálním aditivem s obchodním názvem NO_xAMID 40. Aditivum, které je součástí roztoku mimo jiné zamezuje tvorbě úsad v potrubních trasách a tryskách, zlepšuje tvorbu kapek ve spalovací komoře a má další pozitivní vlivy na technologický proces redukce emisí NO_x při použití dané technologie.

6.7.1 Vlastnosti reagentu NO_xAMID 40

Informace o složení látky

Chemická podstata: roztok močoviny ve vodě

Koncentrace: 40 %

Fyzikální a chemické vlastnosti

Vzhled:

Forma: kapalný

Barva: bezbarvý, čirý, světlžlutý

Pach: mírně po čpavku

Bezpečnostní údaje:

pH: ca. 9 (slabě alkalický)

Počátek krystalizace: 8 °C

Bod varu: 106 – 110 °C

Bod samovznícení: není samozápalný

Hustota: 1112 kg/m³

6.7.2 Výpočet stechiometrického množství reagentu (výkon kotle 40 t/h)

Nejdůležitějším parametrem, který může nejvíce ovlivnit výpočet je stanovení stechiometrického přebytku reagentu. Dle podobných realizací a praktických zkušeností byl zvolen stechiometrický přebytek $\beta = 2,8$. Výpočet byl proveden dle vzorců (35) až (44) v programu Microsoft Excel 2007. Výsledky jsou uvedeny v *tab. 9*. Soubor s výpočtem je na přiloženém CD.

6.7.2.1 Zadávané veličiny

Jedná se o veličiny, které je nutno znát pro provedení výpočtu, tyto veličiny jsou získány měřením, další potom stanoveny. Jejich hodnoty jsou uvedeny v *tab. 5*.

6.7.2.2 Hodnoty redukce při 6 % O₂

- Redukce NO_x pro maximální výkon:

$$\Delta NO_x = NO_x^1 - NO_x^2 \quad [mg / m_N^3] \quad (35)$$

, kde: NO_x^1 ... je stávající obsah NO_x ve spalínách pro maximální výkon, který je uvedený v *tab. 5*

NO_x^2 ... je požadovaný obsah NO_x ve spalínách, který je uvedený v *tab. 5*

- Redukce přepočtená na NO pro maximální výkon:

$$\Delta NO = \Delta NO_x \cdot \frac{M_{NO}}{M_{NO_2}} \quad [mg / m_N^3] \quad (36)$$

, kde: ΔNO_x ... je redukce NO_x pro maximální výkon ze vztahu (35)

M_{NO} ... je molární hmotnost NO [g / mol]

M_{NO_2} ... je molární hmotnost NO₂ [g / mol]

6.7.2.3 Hodnoty redukce přepočteny na skutečný obsah O₂

- Stávající obsah NO_x ve spalínách pro maximální výkon přepočtený na skutečný obsah kyslíku:

$$NO_{x,sk}^1 = NO_x^1 \cdot \frac{21 - O_2^{skut}}{21 - O_2^{ref}} \quad [mg / m_N^3] \quad (37)$$

, kde: O_2^{skut} ... je skutečný obsah kyslíku ve spalínách, který je uvedený v *tab. 5*

O_2^{ref} ... je referenční obsah kyslíku, který má hodnotu 6 %

- Požadovaný obsah NO_x ve spalínách pro maximální výkon přepočtený na skutečný obsah kyslíku:

$$NO_{x,sk}^2 = NO_x^2 \cdot \frac{21 - O_2^{skut}}{21 - O_2^{ref}} \quad [mg / m_N^3] \quad (38)$$

, kde: NO_x^2 ... je požadovaný obsah NO_x ve spalínách, který je uvedený v *tab. 5*

O_2^{skut} ... je skutečný obsah kyslíku ve spalínách, který je uvedený v *tab. 5*

O_2^{ref} ... je referenční obsah kyslíku, který má hodnotu 6 %

- Redukce NO_x pro maximální výkon přepočtená na skutečný obsah kyslíku:

$$\Delta \text{NO}_{x,sk} = \text{NO}_{x,sk}^1 - \text{NO}_{x,sk}^2 \quad [\text{mg} / \text{m}_N^3] \quad (39)$$

, kde: $\text{NO}_{x,sk}^1$... je stávající obsah NO_x ve spalínách pro maximální výkon přepočten na skutečný obsah kyslíku ze vztahu (37)

$\text{NO}_{x,sk}^2$... je požadovaný obsah NO_x ve spalínách pro maximální výkon přepočten na skutečný obsah kyslíku ze vztahu (38)

- Redukce přepočtená na NO a skutečný obsah kyslíku pro maximální výkon:

$$\Delta \text{NO}_{sk} = \Delta \text{NO}_{x,sk} \cdot \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NO}_2}} \quad [\text{mg} / \text{m}_N^3] \quad (40)$$

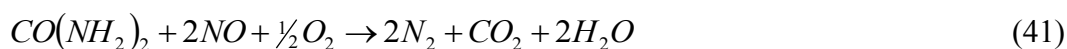
, kde: $\Delta \text{NO}_{x,sk}$... je redukce NO_x pro maximální výkon přepočtená na skutečný obsah kyslíku ze vztahu (39)

M_{NO} je molární hmotnost NO $[\text{g} / \text{mol}]$

M_{NO_2} je molární hmotnost NO_2 $[\text{g} / \text{mol}]$

6.7.2.4 Výpočet množství reagentu

Pro výpočet množství reagentu bylo vycházeno ze zjednodušené rovnice reakce pro redukci v následujícím tvaru.



- Stechiometrická spotřeba močoviny pro maximální výkon

$$Q_m = \frac{\Delta \text{NO}_{sk}}{1000000} \cdot \frac{M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}}{M_{2\text{NO}}} \cdot V_{sp}^s = \frac{\Delta \text{NO}_{sk}}{1000000} \cdot \frac{M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}}{M_{2\text{NO}}} \cdot V_{sp}^v \cdot \frac{w}{100} \quad [\text{kg} / \text{h}] \quad (42)$$

, kde: ΔNO_{sk} je redukce přepočtená na NO a skutečný obsah kyslíku pro maximální výkon ze vztahu (40)

$M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}$... je molární hmotnost močoviny $[\text{g} / \text{mol}]$

$M_{2\text{NO}}$ je molární hmotnost dvou molekul oxidu dusného $[\text{g} / \text{mol}]$

V_{sp}^s je množství suchých spalín pro maximální výkon, které jsou uvedeny v *tab. 5*

V_{sp}^v je množství vlhkých spalín pro maximální výkon, které jsou uvedeny v *tab. 5*

w je obsah vody ve spalínách, který je uvedený v *tab. 5*

- Skutečná spotřeba močoviny pro maximální výkon

$$Q_{m,sk} = Q_m \cdot \beta \quad [kg/h] \quad (43)$$

, kde: Q_m ... je stechiometrická spotřeba močoviny pro maximální výkon ze vztahu (42)

β je zvolený stechiometrický přebytek reagentu [1]

- Skutečná spotřeba roztoku reagentu

$$Q_{r,sk} = \frac{Q_{m,sk}}{\frac{c_r}{100}} \quad [kg/h] \quad (44)$$

, kde: $Q_{m,sk}$... je skutečná spotřeba močoviny pro maximální výkon ze vztahu (43)

c_r je koncentrace močoviny v roztoku [%]

6.7.3 Výpočet stechiometrického množství reagentu (výkon kotle 18 t/h)

Tento výpočet byl proveden stejným způsobem jako v kapitole 6.7.2. Výsledky jsou uvedené v tab. 9.

Popis	Označení	Hodnota		Jednotka
		Výkon kotle 40 t/h	Výkon kotle 18 t/h	
redukce NO _x	ΔNO_x	68	68	mg / m _N ³
redukce přepočítaná na NO	ΔNO	44,351	44,351	mg / m _N ³
stávající obsah NO _x ve spalínách přepočtený na skutečný obsah kyslíku	$NO_{x,sk}^1$	274,075	262,104	mg / m _N ³
požadovaný NO _x ve spalínách přepočtený na skutečný obsah kyslíku	$NO_{x,sk}^2$	204,533	195,600	mg / m _N ³
redukce NO _x přepočtená na skutečný obsah kyslíku	$\Delta NO_{x,sk}$	69,541	66,504	mg / m _N ³
redukce přepočtená na NO a skutečný obsah kyslíku	ΔNO_{sk}	45,357	43,376	mg / m _N ³
stechiometrická spotřeba močoviny	Q_m	2,058	0,936	kg / h
skutečná spotřeba močoviny	$Q_{m,sk}$	5,762	2,619	kg / h
skutečná spotřeba roztoku reagentu	$Q_{r,sk}$	14,404	6,549	kg / h

Tab. 9. Stechiometrické množství reagentu

Potřebné množství redukčního činidla je regulováno pomocí pneumatického regulačního ventilu a kontrolováno pomocí sériově zapojeného indukčního průtokoměru.

6.8 Volba nosného média

Jako nosné médium byla zvolená demineralizovaná voda tzv. demivoda, která slouží k dořezování redukčního činidla a tím ke správnému dávkování reagentu při různých parametrech kotle a různých množstvích redukovaných emisí NO_x . Dále také zajišťuje požadovanou velikost kapek a hloubku vstřiku redukčního činidla do spalovací komory.

Specifikace:

Tlak:	600 [kPa]
Teplota:	10 – 30 [°C]
Karbonátová tvrdost:	< 260 [ppm CaCO_3]
Celková tvrdost:	< 350 [ppm CaCO_3]

Spotřeba: ca. 300 [kg/h]

6.9 Volba rozprašovacího média

Jako rozprašovací médium byl zvolen stlačený vzduch, který je potřebný pro rozprašování redukčního činidla do spalovací komory. Je veden do míchacího a měřicího modulu a dále přes systém armatur k jednotlivým tryskám. Dále je stlačený vzduch využit pro chlazení trysek, zabraňuje jejich ucpávání. Může se také použít jako ovládací vzduch pro řídicí armatury. Tento ovládací vzduch nesmí obsahovat olej a musí být vysušený.

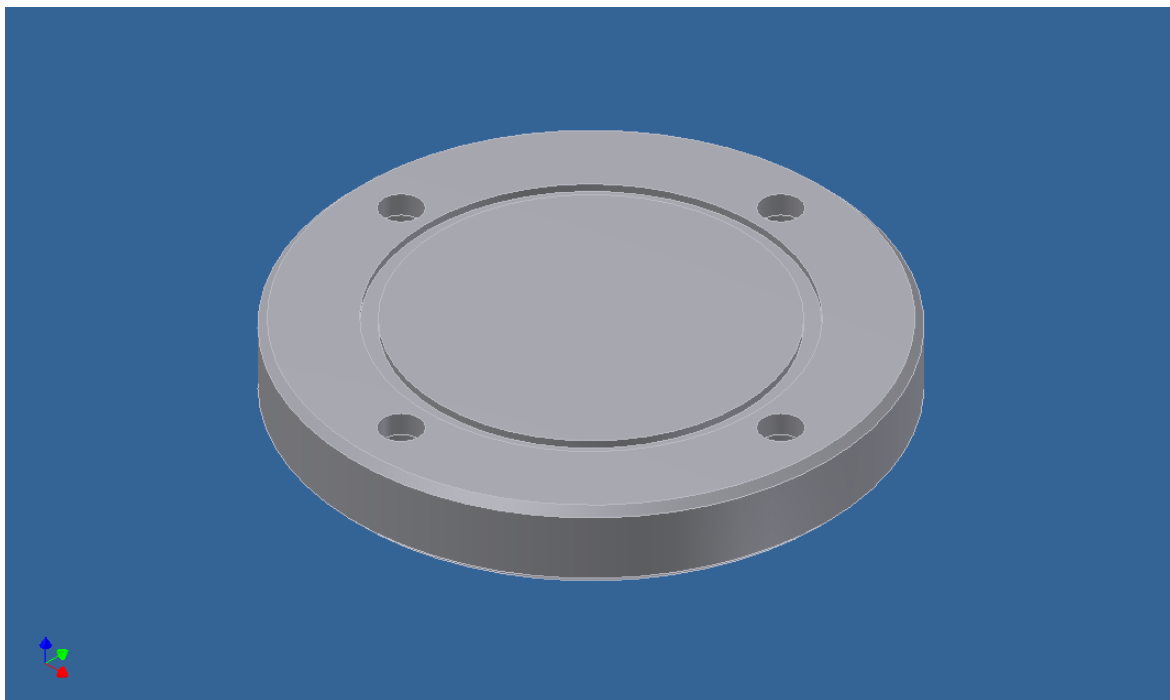
Specifikace:

Tlak:	600 [kPa]
Rosný bod:	- 40 [°C]
Teplota:	10 – 40 [°C]

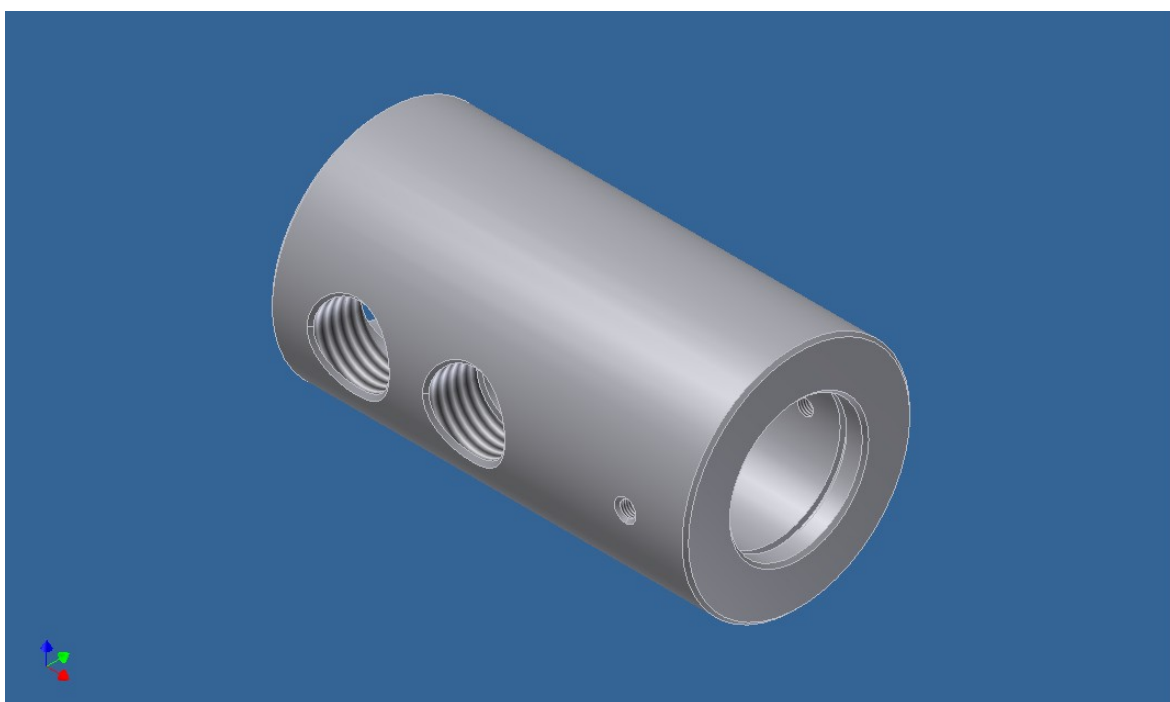
Spotřeba: ca. 160 [kg/h]

6.10 Vlastní návrh rozstřikovacího kopí

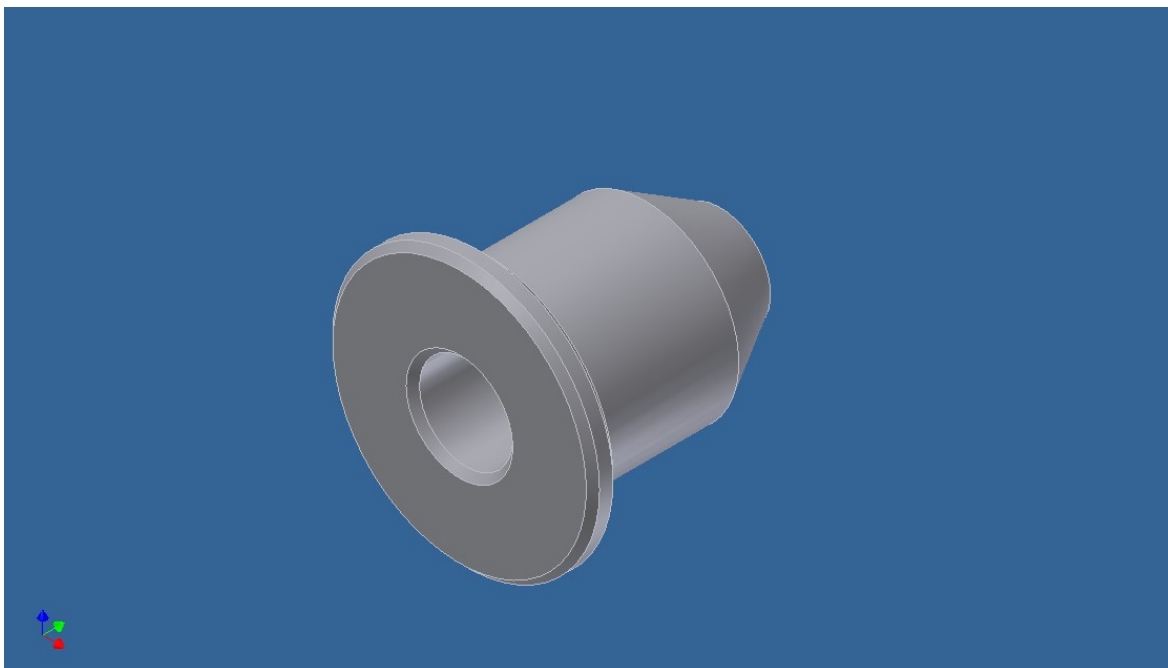
Jedná se o speciální dvousložkovou trysku, která umožňuje homogenní směšování reagentu se spaliny za pomoci využití stlačeného vzduchu jako rozprašovacího média. Jednotlivé výrobní výkresy a výkres sestavy byly narýsovány v programu AutoCAD 2008 a jsou zařazeny v příloze č. 1 až 8. Podle těchto výkresů byly vymodelovány 3D modely jednotlivých částí rozstřikovacího kopí v programu Autodesk Inventor Profesional 2008, které jsou na obr. 22 až 31.



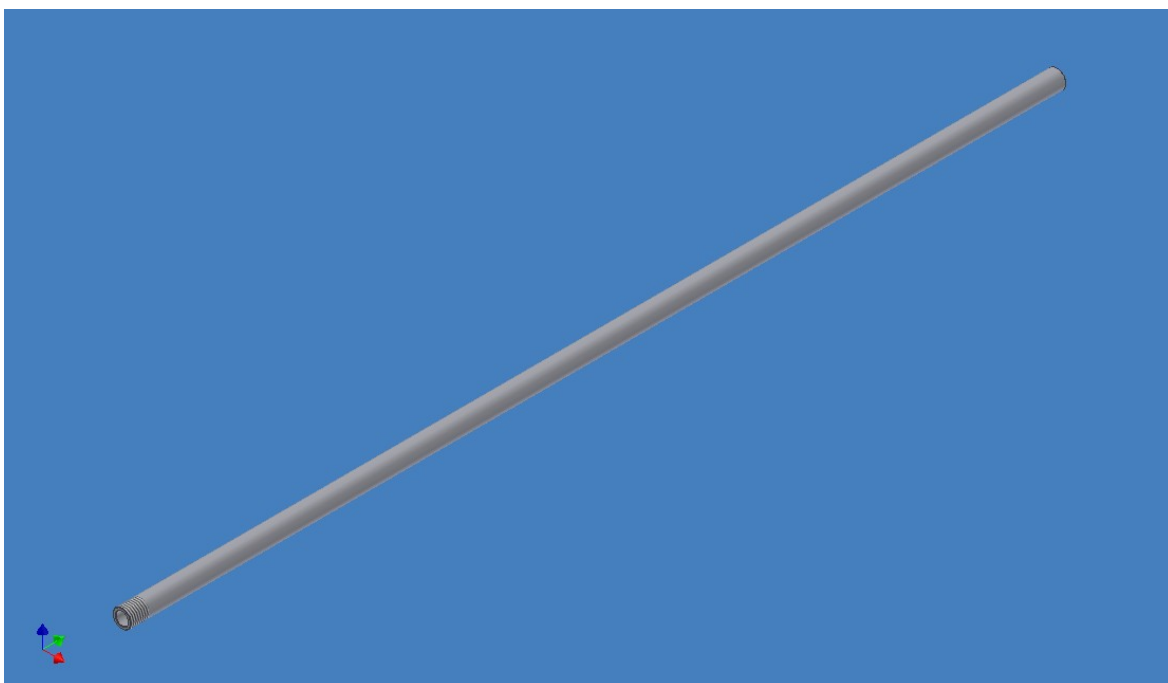
Obr. 22. Viko



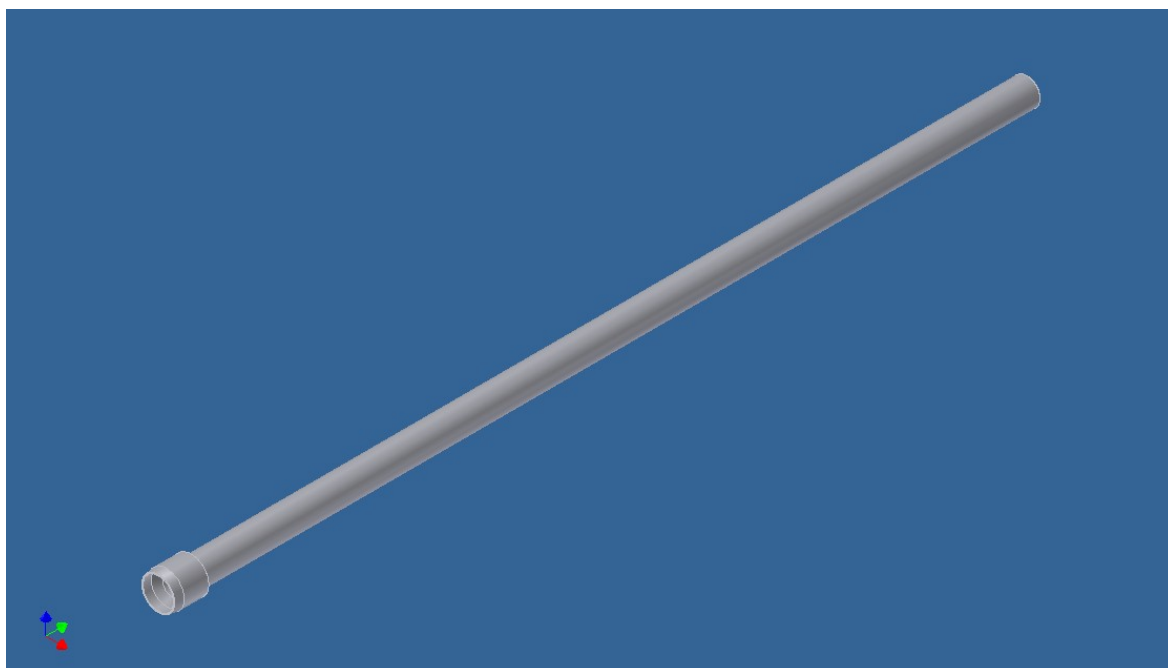
Obr. 23. Tělo



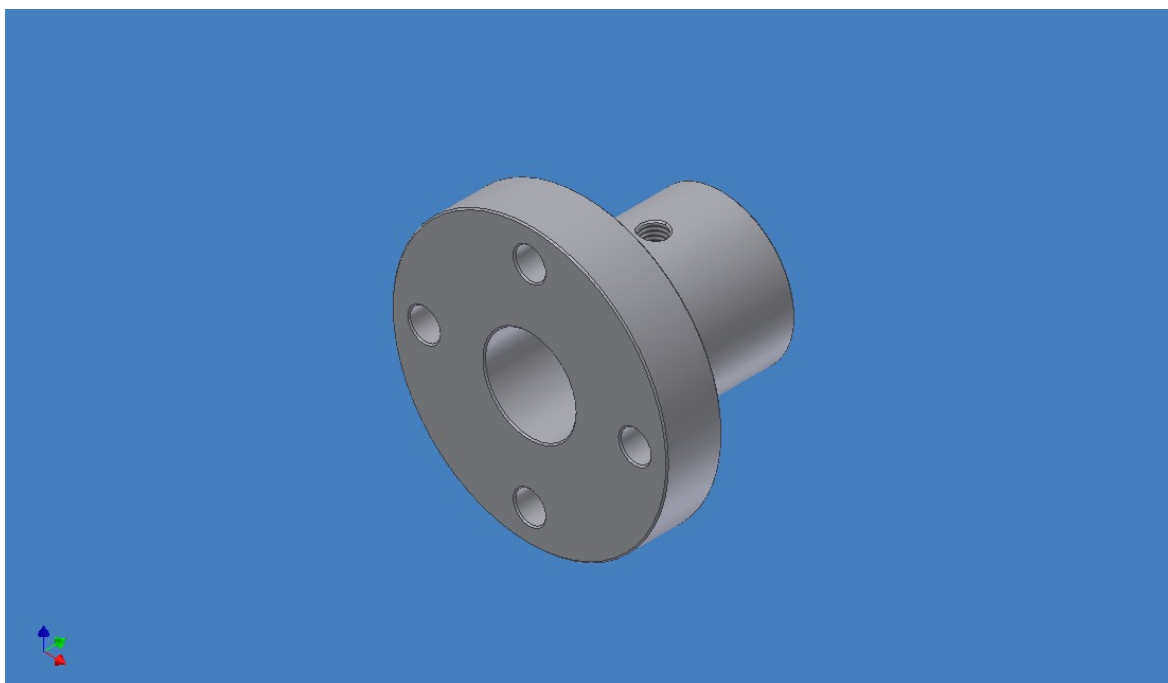
Obr. 24. Atomizér



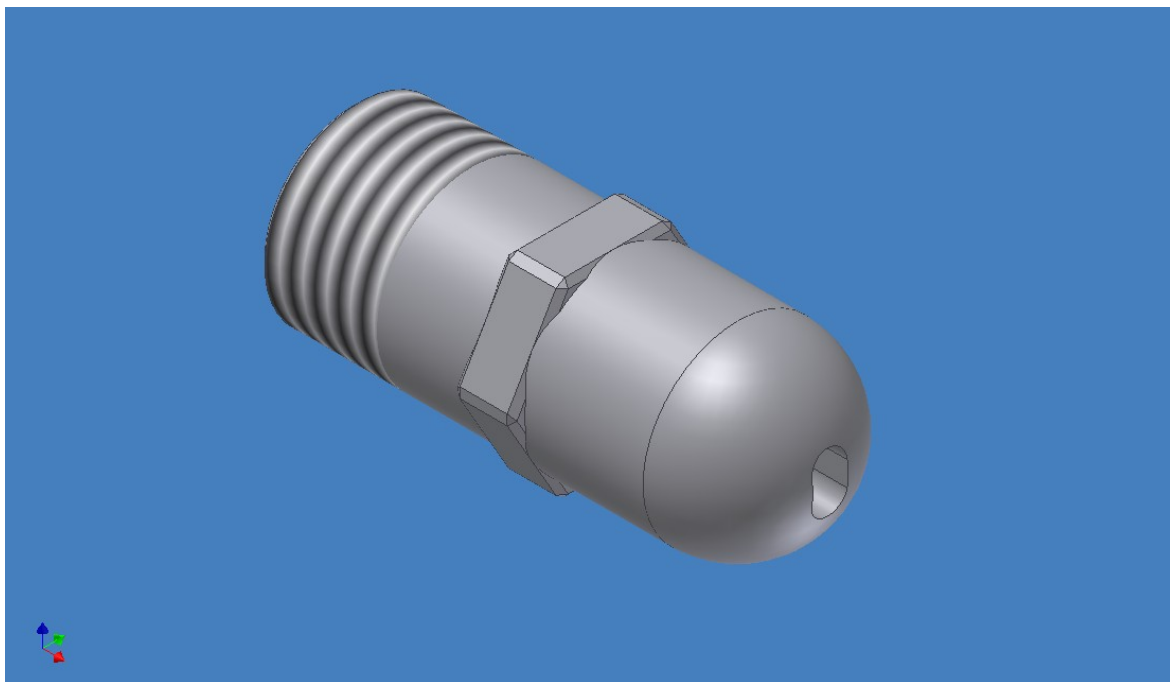
Obr. 25. Vnitřní trubka



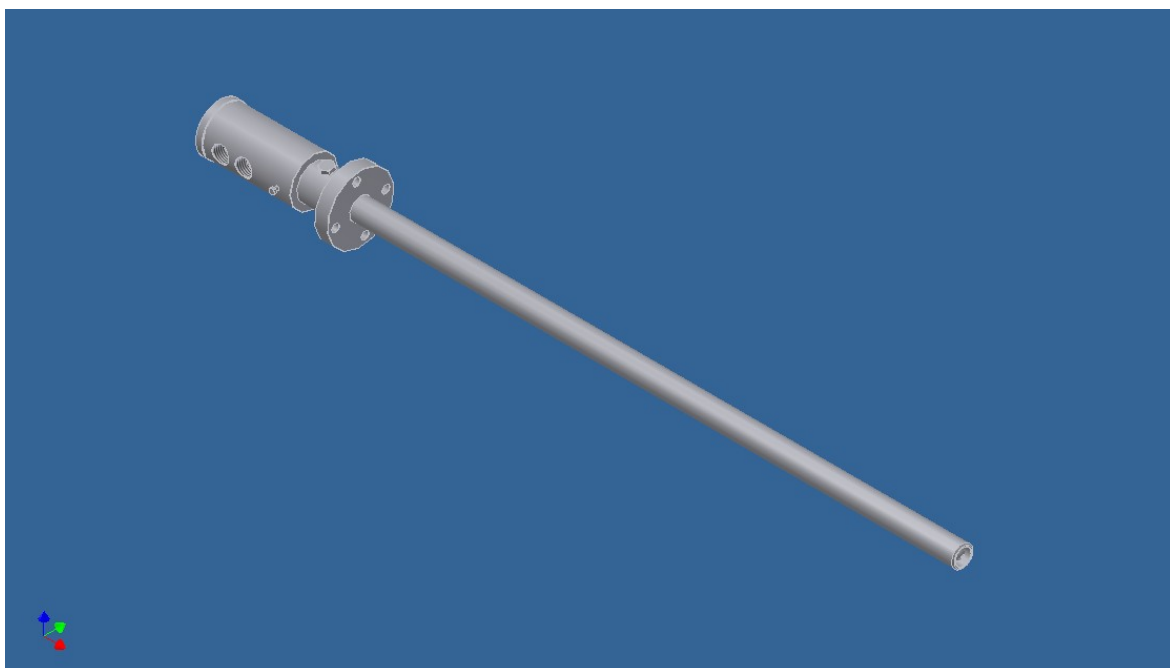
Obr. 26. Ochranná trubka



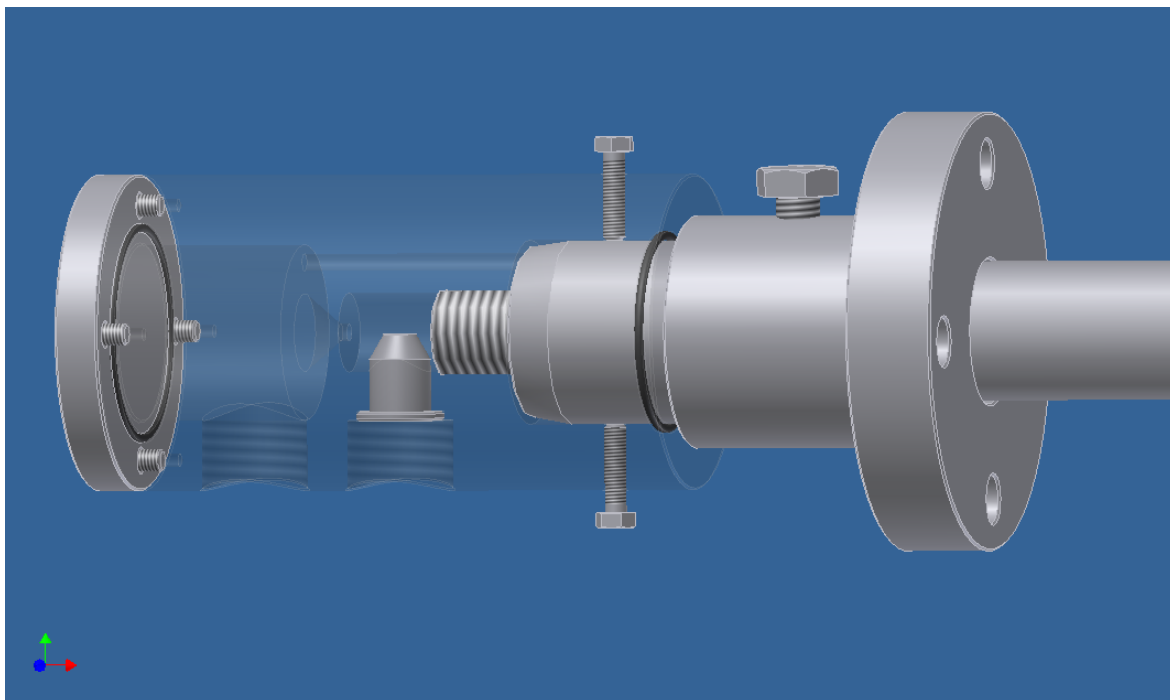
Obr. 27. Příruba



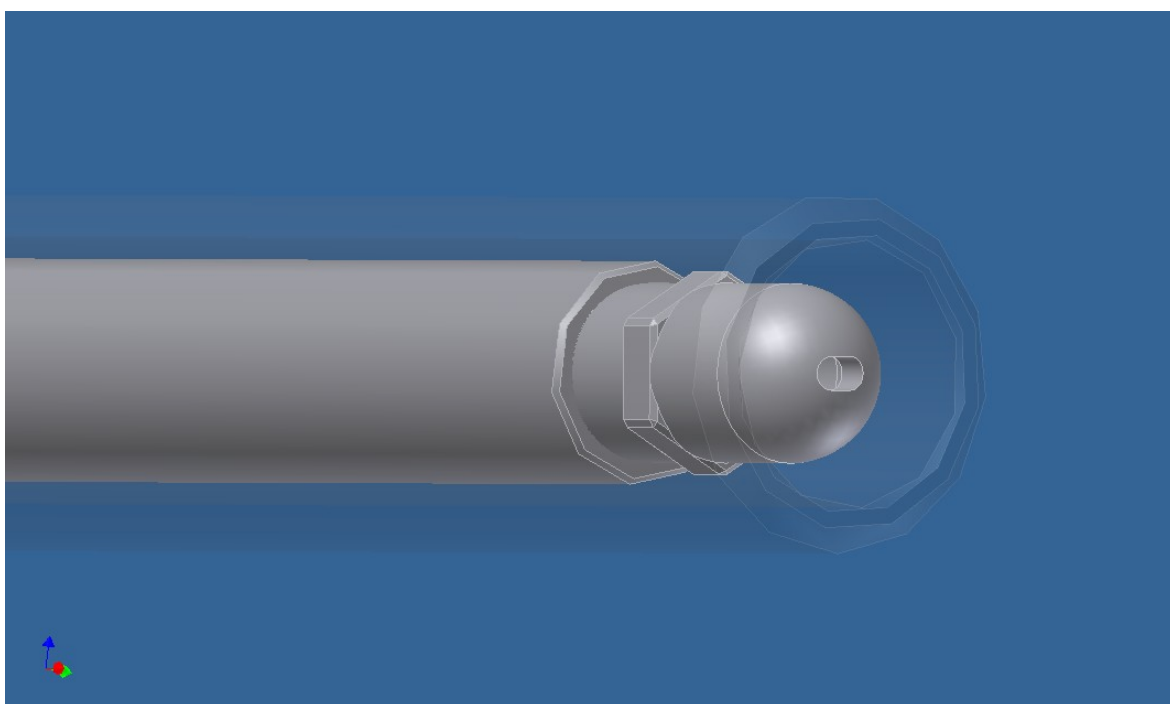
Obr. 28. Tryska



Obr. 29. Sestava rozstřikovacího kopí



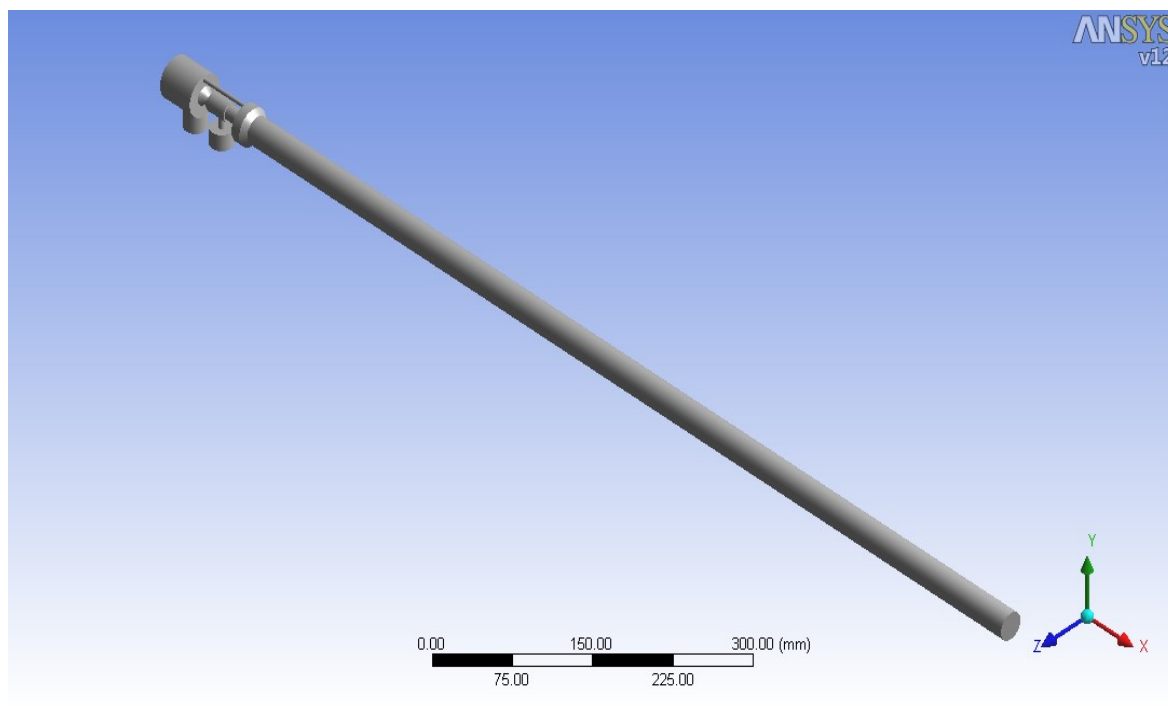
Obr. 30. Uložení jednotlivých částí v těle rozstřikovacího kopí



Obr. 31. Detail trysky

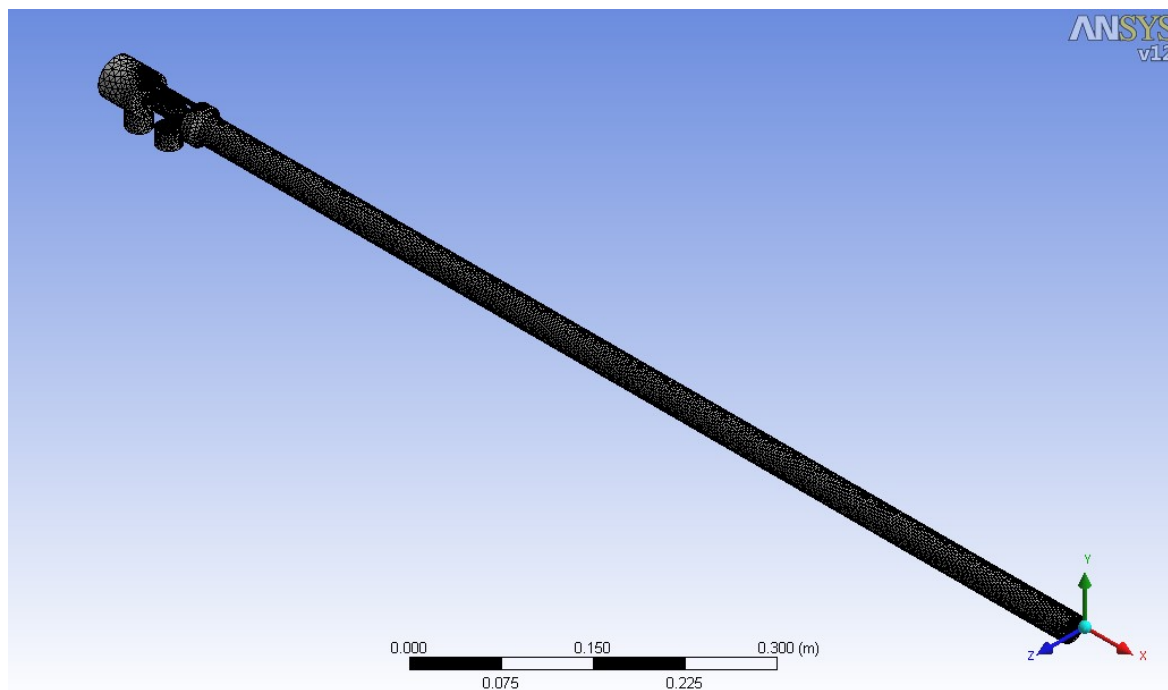
6.10.1 Model proudění a rozstřík rozstříkovacího kopí

Model byl vytvořen v programu ANSYS Workbench 2.0 Framework, Version 12.0.1 a je zobrazeny na obr. 32 až 37.



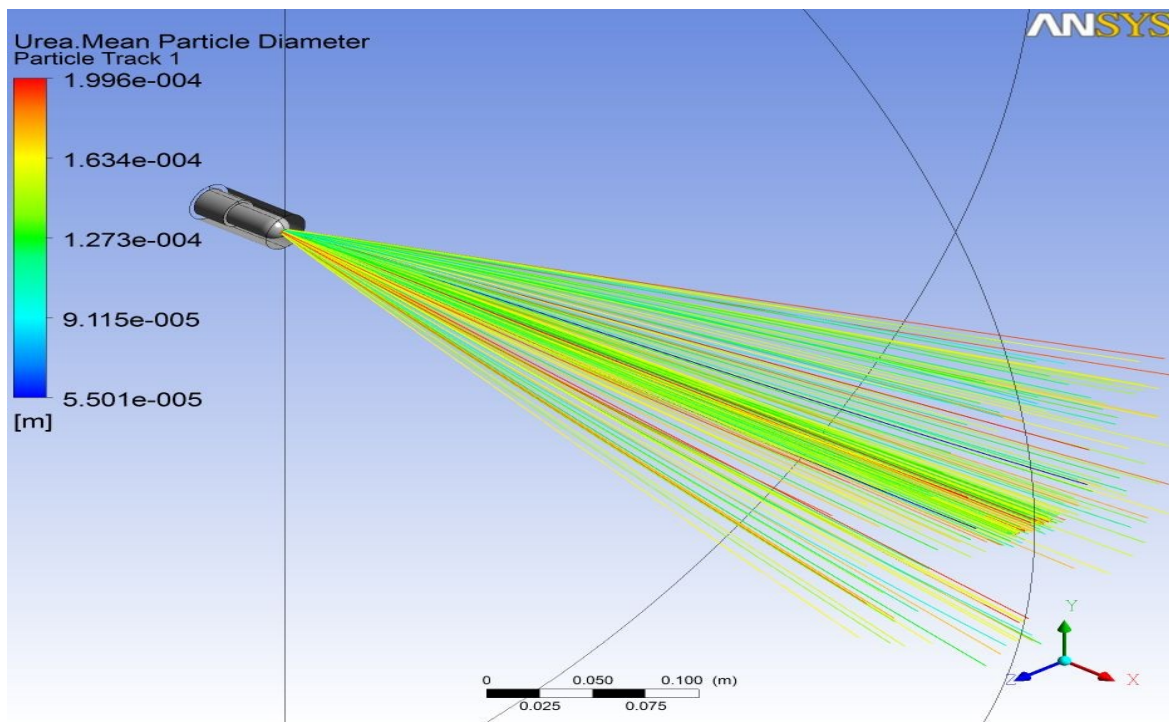
Obr. 32. Geometrie modelu proudění

Na obr. 33 je zobrazena síť jednotlivých elementů, na které je model rozdělen.



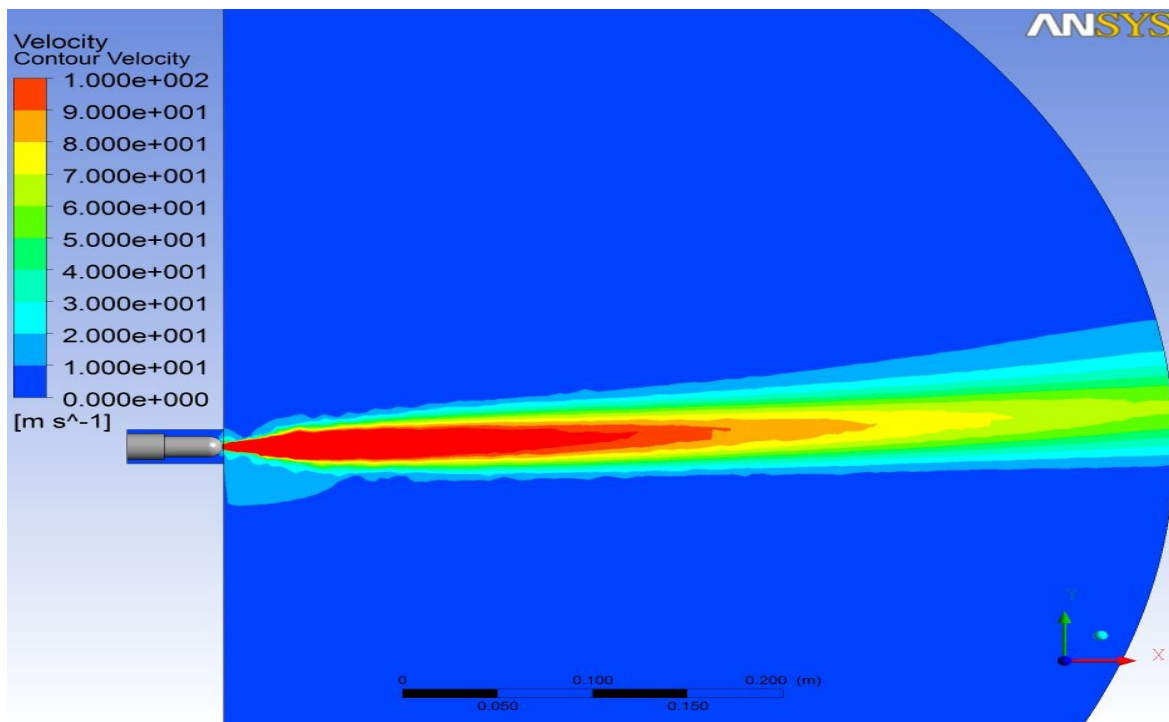
Obr. 33. Síť jednotlivých elementů

Na obr. 34 je vidět, jakým způsobem se budou tvořit kapičky roztoku reagentu, směřující z trysky do kotle a jaká bude jejich velikost.



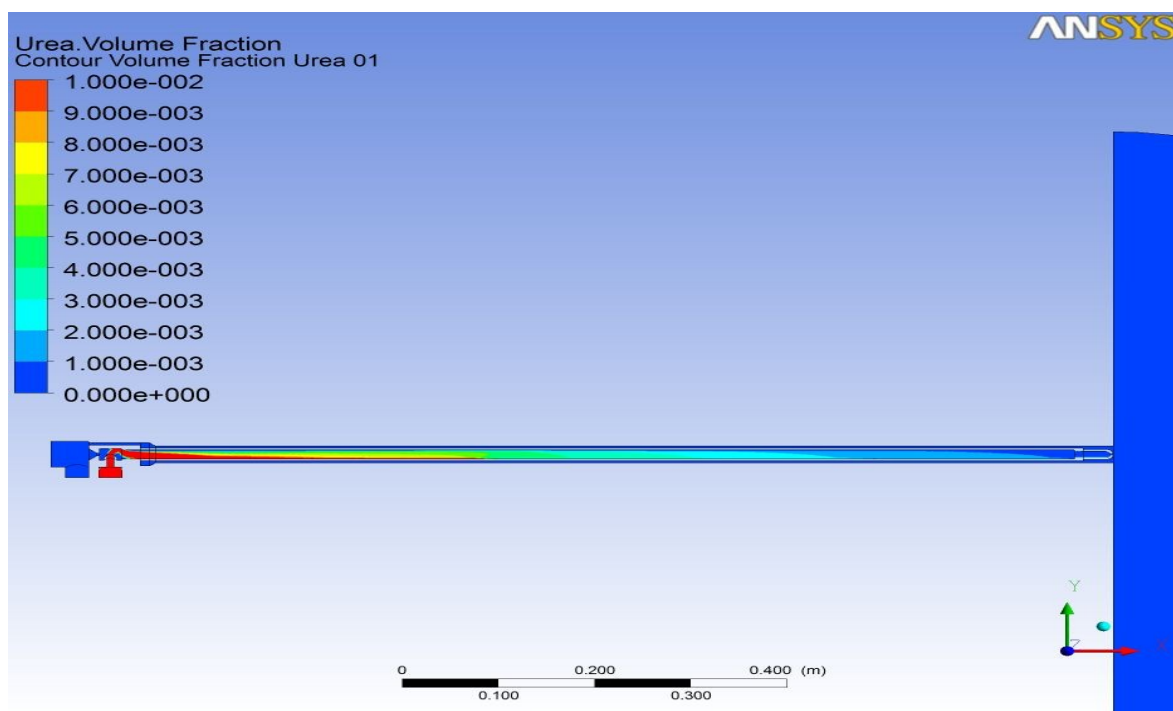
Obr. 34. Kapičky reagentu a jejich velikost

Na obr. 35 je vidět, jak bude vypadat rychlostí profil rozstříku v kotli do vzdálenosti 500 mm od konce rozstříkovacího kopí.



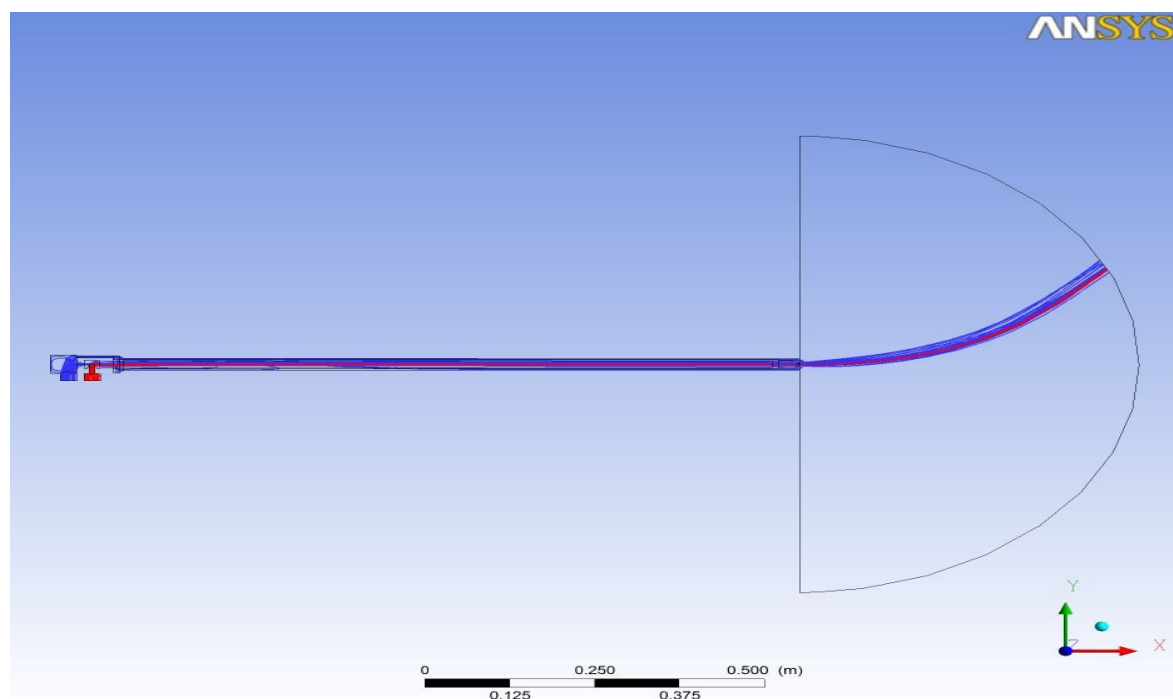
Orb. 35. Rychlostí profil rozstříku

Na obr. 36 je vidět, jakým způsobem se bude reagent mísit s rozstříkovacím vzduchem. Je patrné, že na konci rozstříkovacího kopí bude reagent se vzduchem promísen.



Obr. 36. Mísení reagentu a rozstříkovacího vzduchu

Na obr. 37 je vidět, jakým způsobem bude strháván reagent a rozprašovací vzduch proudícími spalinami po vstříknutí do kotle. Tato směs bude strhávána ve směru proudění spalin, čili směrem vzhůru kotlem.



Obr. 37. Proudění směsi reagentu a rozprašovacího vzduchu po vstříknutí do kotle

6.11 Technicko technologický popis navrženého zařízení SNCR

Základní schémata technologie jsou uvedena na *obr. 38 a 39*. SNCR technologie využívající vodný roztok močoviny jako reagent obsahuje:

- Nádrže na skladování + čerpadla a stáčecí zařízení
- Trasy zařízení do míchacího a měřicího modulu a k jednotlivým tryskám
- Míchací a měřicí modul
- Vstřikovací úroveň nebo více úrovní

6.11.1 Obecný popis

Redukční činidlo je po jeho dodání umístěno ve skladovací nádrži. Odtud je roztok močoviny odčerpán za pomoci ponorných čerpadel přes cirkulační a dopravní potrubní systém a kontaktní manometr do měřicího a míchacího modulu. V měřicím a míchacím modulu jsou instalována veškerá potřebná zařízení nutná pro správnou regulaci a dávkování (vstřikování) redukčního činidla.

6.11.2 Skladování a zásobování

Skladovací nádrž pro redukční činidlo je plastová dvouplášťová z důvodu zamezení úniku reagentu do okolí. Prostor mezi pláštěmi je vybaven bezpečnostním čidlem průsaku a čidlem výšky hladiny. Nádrž je vybavena dalšími potřebnými čidly, ventily a bezpečnostními prvky pro skladování roztoku močoviny. Jedná se o kontinuální měření hladiny, pojistku proti přeplnění. Je také důležité měřit teplotu roztoku, která nesmí klesnout pod 8 °C, kdy začíná vodný roztok močoviny krystalizovat. Z tohoto důvodu je důležité vytápět nádrž, pokud je umístěna ve venkovním otevřeném prostoru.

Nádrž je v horní části vybavena přepadem, který slouží pro zpětnou cirkulaci reagentu. Pro vyprázdnění redukčního činidla z autocisterny je instalováno stáčecí zařízení a plnicí potrubí, které vede z připojené autocisterny do nádrže přes automatický uzavírací ventil, který zamezuje plnění skladovací nádrže. Vyprázdnění autocisterny bude provedeno pomocí přetlaku v autocisterně zajištěného kompresorem automobilu. Dodávka roztoku močoviny je realizována prostřednictvím autocisterny o objemu 20 m³ a proto může být realizována pouze v případě, že do nádrže je možné doplnit celý objem autocisterny.

6.11.3 Čerpadla a zpětná cirkulace

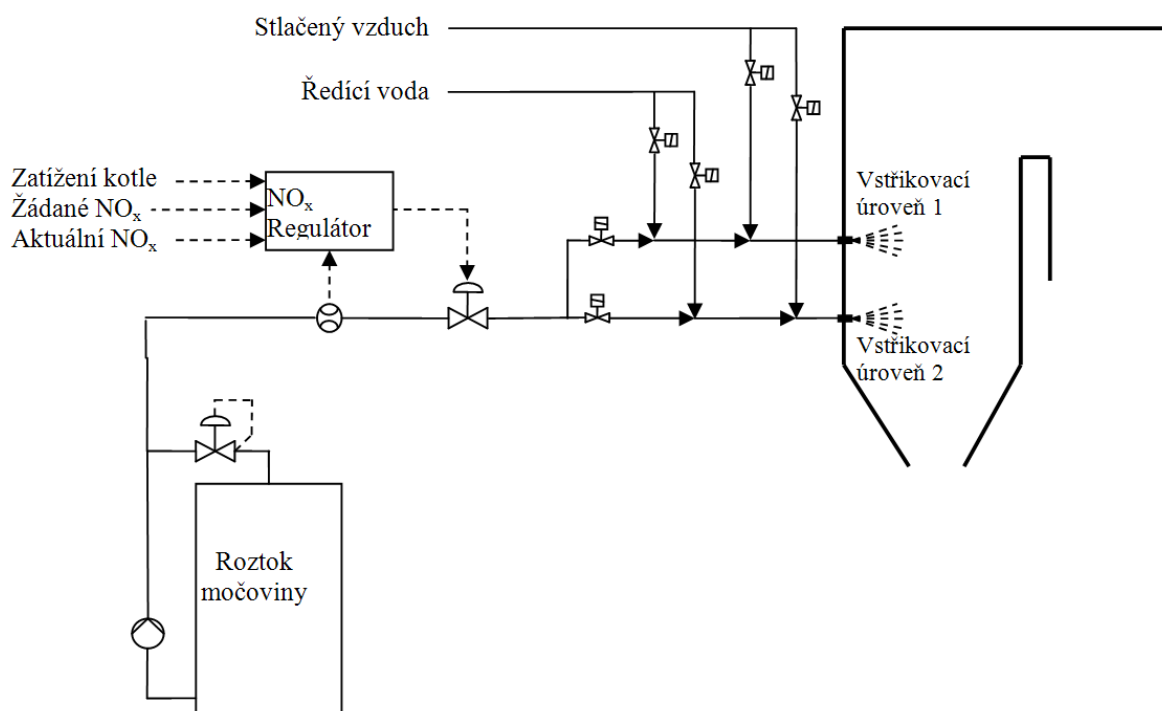
V nádrži jsou instalována dvě ponorná čerpadla pro dopravu roztoku močoviny. První čerpadlo dopravuje redukční činidlo přes potrubí zpětné cirkulace a redukční ventil zpět do nádrže a zároveň do míchacího a měřicího modulu (následně dále k tryskám). Druhé čerpadlo je záložní a spouští se v případě výpadku nebo poruchy prvního čerpadla. Za pomoci redukčního ventilu je udržován konstantní tlak v systému před míchacím a

měřicím modulem. Prostřednictvím potrubního rozvodu je tedy dopravováno redukční činidlo dále do míchacího a měřicího modulu. Díky zpětné cirkulaci, která je vedena do nádrže, bude roztok močoviny neustále promícháván a zamezí se tak tvorbě úsad na dně nádrže.

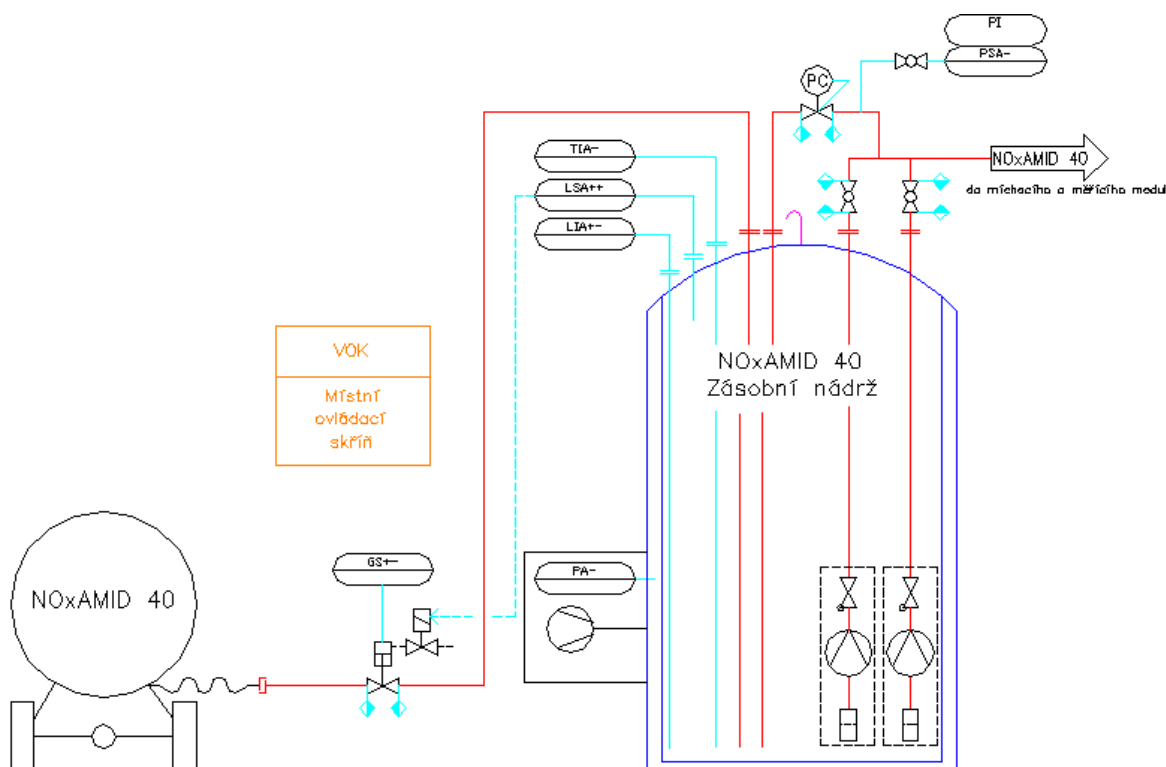
6.11.4 Míchací a měřicí modul

Je to technologický celek, ve kterém jsou vestavěny veškeré přístroje a armatury, které jsou potřebné pro vstřikování reakčního činidla (jako např. ventily, pomocné čerpadlo, statický směšovač, průtokoměry a manometry). Tento modul zajišťuje zásobování vstřikovacích trysek ředěným redukčním činidlem a tlakovým vzduchem. Koncentrovaný roztok močoviny je dodatečně ředěn demivodou (procesní vodou).

Měřicí a míchací modul zajišťuje regulaci průtoku reagentu na základě kontinuálního snímání veličin jako zatížení kotle, porovnávání aktuální a žádané koncentrace NO_x ve spalínách, případně dalších veličin. Koncentrovaný reagent je doředěn procesní vodou a dále je distribuován k jednotlivým tryskám na stěně spalovací komory. Vstřikovací trysky (systém vstřikování) je jedním ze základních částí SNCR technologie, který musí být navržen tak, aby bylo dosaženo maximální redukce NO_x .



Obr. 38. Schéma technologie SNCR



Obr. 39. Zásobní nádrž

6.12 Návrh rozmístění trysek do spalovací komory

Návrh umístění vstřikovacích trysek je důležitý pro zamezení a minimalizaci nežádoucích reakcí s produkty jako jsou NH_3 a CO a dále minimalizuje provozní náklady. Vstřikovací trysky jsou nejčastěji umístěny za oblast, kde dochází ke spalování paliva (radiální oblast), ale často před konvektivní částí kotle. Jelikož je efekt míchání spalin s reagentem hlavní parametr ovlivňující redukci, je nutné se řídit následujícími doporučeními pro distribuci reagentu.

- 1) Konstrukce a umístění vstřikovacích trysek, které zajistí dostatečné promísení reagentu se spalinami, závisí na konstrukci kotle a jeho rozměrech.
- 2) Pro dosažení vysoké účinnosti redukce v plném výkonovém rozsahu kotle je nutné vstřikovací systém realizovat jako víceúrovňový.
- 3) Vzdálenost mezi vstřikovacími tryskami je nutné navrhnout na základě rozstřikovacího kužele.
- 4) Dále je nutné optimalizovat vstřikovací kužel, velikost kapiček atd. prostřednictvím poměru plyn/kapalina, tlaku médií v trysce a využívání rozdílných vstřikovacích trysek.

Konfigurace vstřikovacího systému je individuální a je závislá na místních podmínkách a možnostech, které souvisí s konstrukcí kotle.

6.12.1 Průběh teplot v kotli

V současné době tj. ke dni 21. 3. 2012 je kotel před dokončením a díky tomu není možné provést měření průběhu teplotních polí v kotli, které je základním předpokladem pro správné určení vhodného místa pro instalaci jednotlivých rozstřikovacích kopí. Údaje o průběhu teplot ve spalovací komoře byly zjištěny z technické dokumentace fluidního kotle Teplárny Strakonice, a.s., která byla vyhotovena firmou TENZA, a.s. prostřednictvím modelových výpočtů. Průběhy teplot jsou uvedeny v *tab. 10*. Na základě těchto teplot bylo navrženo rozmístění otvorů pro jednotlivá rozstřikovací kopí, které je v *příloze č. 9*.

Byly navrženy dvě vstřikovací úrovně. Každá vstřikovací úroveň má čtyři rozstřikovací kopí. Nižší vstřikovací úroveň je provozní (na *obr. 38* je označena jako vstřikovací úroveň 2) a druhá (vyšší) je rezervní, pro případ změny teplotního rozložení v kotli v důsledku změny typů paliva, nebo díky jiným zásahům do spalovacího procesu. Jednotlivé kopí jsou uchyceny do přírub prostřednictvím šroubů M 10x15. Pokud by byla potřeba změnit vstřikovací úroveň, stačí kopí demontovat z nižší úrovně a namontovat je na úroveň vyšší. K těmto přemístěným kopím se však musí také přivést potrubní rozvody roztoku reagentu a stlačeného vzduchu. Vytvořené otvory, určené pro další úroveň rozstřikovacích kopí, mohou být použity ke kontrolnímu provoznímu měření teploty v kotli.

Místo v kotli	60 % hnědé uhlí a 40 % dřevní štěpka	
	Výkon kotle 40 [t/h]	Výkon kotle 18 [t/h]
	T [°C]	T [°C]
Fluidní vrstva	850,0	850,0
Spalovací komora	900,0*	900,0*
Konec spalovací komory	863,2	703,0
SH 2	704,1	570,0
SH 1	485,6	387,8
Evaporátor (výparník)	395,5	326,9
EKO 2	335,6	272,6
EKO 1	197,1	165,7
Spaliny do komína	137,5	109,3
* Tato teplota se nachází ca. 1,5 – 2 m nad přívodem sekundárního vzduchu		

Tab. 10. Průběh teplot v kotli [8]

7 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Jelikož před dokončením této diplomové práce nebyl daný fluidní kotel v Teplárně Strakonice v provozu a nebyla na něj nainstalována navržená technologie SNCR, není možné zhodnotit dosažené výsledky.

V teplárně je navržený fluidní kotel se stacionární fluidní vrstvou, který překračuje žádanou hodnotu produkce NO_x jen málo. To odpovídá i malé spotřebě redukčního činidla. Důvody proč zde nebyl postavený fluidní kotel, který by splňoval požadovanou hodnotu produkce NO_x (fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou), jsou větší investiční náklady a nedostatek místa. Nový kotel se musel umístit do již stávající budovy teplárny. Dále bylo požadováno, aby kotel byl schopen spalovat biomasu společně s hnědým uhlím, nebo samostatné hnědé uhlí. Proto zde byl zvolen tento typ kotle a přistoupilo se na redukci oxidů dusíku prostřednictvím SNCR metody.

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo všeobecné seznámení s jednotlivými typy oxidů dusíku, které se vyskytují ve spalínách po spalovacích procesech. Představuje jejich největší producenty. Popisuje nejčastěji v energetice používané metody snižování těchto škodlivých látek a navzájem je porovnává. Seznamuje čtenáře s jejich realizovatelností, klady a zápory.

První část práce popisuje přehled základních fyzikálních principů termínu a definic používaných při snižování NO_x ve spalínách. Je zde popsáno rozdělení jednotlivých typů NO_x podle charakteristického způsobu jejich tvorby.

Další část obsahuje postupný rozbor způsobů snižování tvorby a následnou redukci již vytvořených oxidů dusíku. Seznamuje nás s primárními a sekundárními opatřeními a vysvětluje jejich realizovatelnost u jednotlivých energetických zařízení.

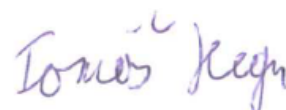
Poslední praktická část popisuje návrh zařízení pro denitrifikaci palin metodou SNCR ve fluidním kotli o výkonu 30,47 MW v Teplárně Strakonice. Představuje fluidní kotle, jejich dělení a výhody. Jsou zde základní údaje o společnosti Teplárna Strakonice, a.s., popis řešeného kotle a složení paliva v tomto kotli spalovaném. Hlavním úkolem bylo navrhnout tvar kopí k rozstřikovávání reagentu. Dále je zde řešen stechiometrický výpočet pro dané palivo ve dvou výkonových hladinách a to 40 t/h a 18 t/h vyrobené páry.

Byl zde zvolen typ redukčního činidla (roztok močoviny se speciálním aditivem s obchodním názvem $\text{NO}_x\text{AMID 40}$) a vypočteno stechiometrické množství reagentu opět pro dvě výkonové hladiny kotle. Výsledkem bylo, že pro maximální výkon bude skutečná spotřeba roztoku reagentu 14,404 kg/h a pro minimální výkon bude tato spotřeba 6,549 kg/h. Jako nosné médium byla zvolena demineralizovaná voda o spotřebě ca. 300 kg/h a rozstřikovacím médiem byl zvolen stlačený vzduch o spotřebě ca. 160 kg/h. V programu ANSYS Workbench 2.0 Framework, Version 12.0.1 byl vytvořen model proudění v rozstřikovacím kopí a tvar rozstřiku trysky. Technicko technologický popis navrženého zařízení popisuje způsob skladování, zásobování a dávkování redukčního činidla a nejdůležitější části zařízení, které řídí celkový chod technologie SNCR. Tímto zařízením je měřicí a míchací modul. Na závěr je řešeno rozmístění jednotlivých rozstřikovacích trysek ve spalovací komoře, které je uvedeno v příloze č. 9. Bude použita jedna vstřikovací úroveň, která se nachází 1750 mm nad přívodem sekundárního vzduchu a bude mít čtyři rozstřikovací kopí. Dvě kopí budou umístěny na pravé straně kotle a dvě na levé.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. ing. Bohumír Čech za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě ORGREZ, a.s. Ostrava za praktické zkušenosti a důležité materiály, které mi významně pomohly.

V Ostravě: 21. 5. 2012



.....
(podpis autora)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VEJVODA, J.; MACHÁČ, P.; BURYAN, P. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů* (skripta). Praha VŠChT, 2003 – 226 s., ISBN 80-7080-517-X
- [2] *Tvorba škodlivin při spalování* [online]. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, [cit. 2012-3-8]. Dostupný z WWW: <<http://vec.vsb.cz/cs/doc/tvorba.pdf>>
- [3] *Teplárna Strakonice, a.s.* [online]. Výroční zpráva za rok 2010 [cit. 2012-3-8]. Dostupný z WWW: <http://www.tst.cz/doc/VZTST_2010.pdf>
- [4] *Mehldau & Steifath Umwelttechnik GmbH* [online]. Ist das SNCR – Verfahren noch Stand der Technik, Berlin 2008.pdf, [cit. 2012-3-8]. Dostupný z WWW: <<http://www.ms-umwelt.de>>
- [5] PROJEK MPO ČR. *Referenční dokumenty o nejlepších technikách (BREF) pro velká spalovací zařízení*. Praha, Listopad 2003. 588 s.
- [6] Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě, GAS s.r.o.
- [7] STUDIE, Koncepce denitrifikace kotlů K12 – K14 v ETB, ORGREZ, a.s., pracoviště Ostrava – divize ekologických systémů
- [8] TENZA, a.s., Svatopetrská 7, 617 00 Brno, Technická dokumentace fluidního kotle Teplárny Strakonice, a.s.
- [9] Měření emisí ve fluidním kotli s cirkulující fluidní vrstvou, Ing. Tomáš Výtisk, VŠB – TU Ostrava

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|---|------------------------------|
| Příloha č. 1: Výrobní výkres Víka | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 2: Výrobní výkres Těla | (formát: A3, počet stran: 1) |
| Příloha č. 3: Výrobní výkres Atomizéru | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 4: Výrobní výkres Vnitřní trubky | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 5: Výrobní výkres ochranné trubky | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 6: Výrobní výkres Příruby | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 7: Výrobní výkres Trysky | (formát: A4, počet stran: 1) |
| Příloha č. 8: Výkres sestavy Rozstřikovacího kopí | (formát: A3, počet stran: 1) |
| Příloha č. 9: Výkres kotle s rozmístěním trysek | (formát: A3, počet stran: 1) |